

Desenvolvimento de uma ferramenta de análise da capacidade produtiva numa Indústria de Semicondutores

António Luís Mesquita Guimarães de Castro Lencastre

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Eduardo Gil da Costa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2021-07-19

“(...) the goal is to transform data into information and information into insight.”

Carly Fiorina, 2004

Resumo

Na indústria de semicondutores é primordial estabelecer planos de produção que consigam dar resposta às encomendas dos clientes, colocadas num horizonte de planeamento que é da ordem dos meses até alguns anos, e que utilizem da forma mais eficiente os equipamentos e recursos disponíveis (Zhang et al. 2020).

A ideia para o projeto de dissertação tratado no presente relatório nasceu da necessidade de melhor compreender a utilização real dos equipamentos numa fábrica de semicondutores, na ATEP – Amkor Technology Portugal. Pretendia-se estabelecer um planeamento de capacidade mais próximo da realidade da fábrica, e monitorizar a evolução da utilização e disponibilidade dos equipamentos. Estas duas temáticas são fulcrais para garantir uma boa competitividade da empresa, nesta indústria que é das mais complexas e de maior evolução em todo o mercado.

O projeto desenvolvido tem como principal propósito o desenvolvimento de uma ferramenta em EXCEL capaz de definir a capacidade produtiva de um conjunto de equipamentos, ao determinar o estado operativo de cada equipamento. O estado é definido através da interpretação das transações disponibilizadas em sistema relativas ao processamento de material por cada equipamento. Também se pretende desenvolver relatórios simples, de fácil interpretação e manipuláveis pelo utilizador, para apresentar a informação tratada pela ferramenta e facilitar análises subsequentes desta informação. Em suma, o objetivo consiste em pegar em dados relativos a transações associadas ao processamento de material, difíceis de interpretar sem um tratamento adequado, e manipulá-los, por meio de operações e cruzamento com informação de outras bases de dados, para obter informação do real funcionamento dos equipamentos e analisá-la.

Para desenvolver a ferramenta foi necessário adquirir conhecimento sobre o funcionamento geral do processo produtivo e compreender o modo de processamento dos equipamentos a analisar. De seguida, desenvolveu-se uma ferramenta capaz de caraterizar a capacidade produtiva dos equipamentos, através do cálculo dos tempos de cadência e da determinação de um conjunto de estados que permitem melhor caraterizar o estado produtivo e os estados associados à máquina parada. No final, foram utilizados os relatórios desenvolvidos para estudar os equipamentos e identificar aspetos a melhorar no seu funcionamento.

O emprego da ferramenta permitiu caraterizar a utilização dos equipamentos com uma classificação mais individualizada dos diferentes estados produtivos dos equipamentos. Para além disto, foi possível identificar quebras na *performance* dos equipamentos e, em certos casos, estabelecer as causas para as mesmas.

Development of a productive capacity analysis tool in the semiconductor industry

Abstract

In semiconductor industry it is imperative to design production plans that meet customer demand throughout the planning horizon, that could be from some months to a couple of years, and that use in the most efficient way the available resources and equipment (Zhang et al. 2020).

The idea for this dissertation project emerged from the need to better understand the true equipment utilization in a semiconductor fab – at ATEP, Amkor Technology Portugal. The main goals were to define a closer to the fab reality capacity planning, and to monitor the evolution of the equipment utilization and availability. These two subjects are crucial to assure competitiveness, in this industry that is one of the most complex and of greater evolution.

The main purpose of the project is to develop a tool in EXCEL to establish the productive capacity for a set of equipment, through the determination of the operative status of each equipment. The status is determined by an interpretation of the transactions that are available, relative to the processing of each productive unit and to each machine. It is also intended to develop simple, intuitive, and easily manipulated reports, to present the information processed by the tool and to facilitate the subsequent analysis of this information. In short, the main purpose is to start with the transaction data regarding the material processing, that are difficult to analyse without the proper treatment, and to manipulated them, performing a set of operations, and crossing with data from different databases, to get information about the real operation of the equipment, and to analyse it.

In order to develop the tool, it was necessary to understand the productive process and the particularities of the selected equipment operation. Then, a tool was developed to characterize the productive capacity for a set of equipment, through the calculation of the throughput and the determination of a set of status that allow for a better characterization of the productive time and down time. With the finished tool, the resulting reports were used to analyse the different machines and to identify aspects to improve in their operation.

The use of the developed tool enabled the presentation of information with a greater level of detail, for an estimation of the utilization closer to reality and specific for each equipment, regarding the distinct status that the equipment goes through during the productive process. Besides that, it was possible to identify tumbles in equipment performance and, in many cases, establish their causes.

Agradecimentos

O primeiro agradecimento não podia deixar de ir para os meus pais, para os meus irmãos e para toda a minha família pelo apoio, em todos os aspetos, que sempre me deram. Agradeço, também, aos meus amigos e colegas de curso, pelo apoio, preocupação e disponibilidade.

Aos Professores e restantes membros do corpo docente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, agradeço pelo trajeto que proporcionaram, pelos desafios, pelo conhecimento transmitido e pelo suporte prestado. Por todo o suporte, acompanhamento e orientações dadas ao longo do desenvolvimento do projeto, agradeço ao Professor Eduardo Gil da Costa.

Para terminar, presto os meus agradecimentos à ATEP que me acolheu para desenvolver este projeto, a todos os membros desta equipa com os quais tive a oportunidade de trabalhar. Um agradecimento especial ao Engenheiro Tiago André Cunha Rodas, orientador do projeto na empresa, pelo enorme investimento neste projeto, por todo o apoio, disponibilidade e proximidade prestados durante estes meses.

Índice de Conteúdos

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	O projeto de análise da capacidade produtiva na ATEP	2
1.3	Objetivos do projeto.....	3
1.4	Método seguido no projeto	3
1.5	Estrutura da dissertação	4
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Planeamento de capacidade	5
2.2	Análise da <i>performance</i> de equipamentos	6
2.2.1	<i>Total Productive Maintenance</i> (TPM)	6
2.2.2	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (OEE)	6
2.2.3	<i>Speed Loss</i>	7
2.2.4	<i>Raw Tool Time</i> (RTT)	7
2.2.5	Norma SEMI E10	7
2.3	<i>Lean Manufacturing</i>	8
2.3.1	Análise “5-Whys”.....	9
2.3.2	Ciclo PDCA.....	9
2.4	Sete Ferramentas Básicas da Qualidade	10
2.4.1	Análise de Pareto	10
2.4.2	Diagrama de Ishikawa	11
2.5	Análise <i>Drill-Down</i>	11
3	Descrição da Situação Atual	12
3.1	A Indústria de Semicondutores.....	12
3.2	Semicondutores e Processo Produtivo - eWLB	12
3.2.1	RDL - Metrologia	14
3.3	Equipamentos em estudo	15
3.3.1	Equipamentos A	15
3.3.2	Equipamentos B.....	15
3.3.3	Equipamentos C.....	15
3.3.4	Equipamentos D	16
3.4	Metodologia seguida.....	16
3.4.1	<i>Software de Material Tracking</i> (M2Go).....	16
3.4.2	<i>Software</i> de monitorização do estado dos equipamentos - CERBERUS	17
3.4.3	Metodologia de cálculo do RTT através do EDEX.....	18

3.4.4	Metodologia de cálculo da utilização dos equipamentos	18
4	Desenvolvimento da ferramenta e definição de planos de ação.....	20
4.1	Pontos a realçar no estado atual e objetivos para a ferramenta.....	20
4.2	Desenvolvimento da ferramenta	20
4.2.1	Definição dos estados operacionais da ferramenta.....	21
4.2.2	Determinação dos estados operacionais da ferramenta	24
4.3	Cálculo do OEE	25
4.4	Iterações mais relevantes na ferramenta	27
4.4.1	Determinação do <i>Speed Loss</i>	27
4.4.2	Cruzamento com os dados do CERBERUS	28
4.4.3	Generalização da utilização da ferramenta.....	28
4.5	Funcionamento da ferramenta.....	29
4.6	Utilização da ferramenta	30
4.7	Apresentação dos resultados obtidos	31
4.8	Comparação dos resultados apresentados pela ferramenta com o CERBERUS	34
5	Oportunidades de melhoria na utilização dos equipamentos	36
5.1	Categorias de perdas a estudar	36
5.1.1	<i>Idle</i>	37
5.1.2	<i>Speed Loss</i>	37
5.1.3	<i>Oversampling</i>	41
5.1.4	<i>Rework – Wafer Reprocessing</i>	46
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	49
	Referências	51
	Anexo A: Diagramas de apoio.....	54
	Anexo B: Visão geral das famílias de equipamentos B, C e D	57
	Anexo C: Utilização da ferramenta	59
	Anexo D: Principais gráficos apresentados pela ferramenta, no ficheiro de análise.....	61
	Anexo E: Gráficos de suporte à análise do <i>Wafer Reprocessing</i> , gerados pela ferramenta	75
	Anexo F: Monitorização e estimativa do RTT (trabalho futuro).....	78
	Anexo G: Diferentes abordagens para cruzamento de dados com o CERBERUS (trabalho futuro)	80

Siglas

EN	<i>Engineering</i>
FOUP	<i>Front Opening Unified Pod</i>
IC	<i>Integrated Circuit</i>
OEE	<i>Overall Equipment Efficiency</i>
OSAT	<i>Outsourced Semiconductor Assembly and Test</i>
RDL	<i>Redistribution Layer</i>
RTT	<i>Raw Tool Time</i>
SB	<i>Stand by</i>
SD	<i>Scheduled Downtime</i>
TBL	<i>Time Between Lots</i>
TBW	<i>Time Between Wafers</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
UD	<i>Unscheduled Downtime</i>
WIP	<i>Work in Process</i>
WLFO	<i>Wafer-Level Fan-Out</i>

Índice de Figuras

Figura 1 - Diagrama com as Seis Grandes Perdas em TPM, adaptado de (Leitão, Almada-Lobo, and Guimarães 2019).....	6
Figura 2 - SEMI E10 - Os seis estados básicos e suas agregações, adaptado de (Pomorski n.d.)	7
Figura 3 - Diagrama de relação entre os estados da norma SEMI E10 com a SEMI E79, adaptado de (Pomorski n.d.)	8
Figura 4 - Ciclo PDCA, adaptado de (A. Faria 2020)	10
Figura 5 - Wafer, chip e package, imagem retirada de (Hitachi High-Tech n.d.).....	13
Figura 6 - Fluxograma do fluxo produtivo eWLB	13
Figura 7 - Utilização de equipamentos A, entre w202115 e w202120, extraído do primeiro módulo do CERBERUS	17
Figura 8 - Estado de equipamentos da família A, na semana w202120, extraído do segundo módulo do CERBERUS	18
Figura 9 - Exemplo do funcionamento de um equipamento e corresponde estado atribuído - Nível I.....	22
Figura 10 - Exemplo do funcionamento de um equipamento e corresponde estado atribuído - Nível II.....	23
Figura 11 - Exemplo do funcionamento de um equipamento e corresponde estado atribuído - Nível III	23
Figura 12 - Diagrama com as relações entre os Estados SEMI E10, Estados da Ferramenta e Elementos do OEE	26
Figura 13 - OEE nos equipamentos da família A, w202101-w202120.....	27
Figura 14 - Fluxograma com o funcionamento geral da ferramenta	30
Figura 15 - Visão geral do conjunto de equipamentos da família A, ao longo das primeiras vinte semanas de 2021	32
Figura 16 - Comparação entre os resultados obtidos pela ferramenta e apresentados pelo CERBERUS, para a família A, relativos ao mês de março de 2021	35
Figura 17 - Análise de Pareto das perdas de OEE, na família A, entre as semanas w202108 e w202120	37
Figura 18 - Speed Loss acumulado por equipamento, para equipamentos da família A, entre w202101 e w202120.....	38
Figura 19 - Evolução do Speed Loss acumulado no Equip#A01, ao longo das primeiras vinte semanas de 2021	38
Figura 20 - Análise de Pareto ao Speed Loss acumulado no Equip#A01, por produto, entre w202108 - w202120	39
Figura 21 - Speed Loss acumulado e wafers processadas, por step, no Equip#A01, entre w202108 - w202120	39
Figura 22 - Evolução diária do Speed Loss no Step#08 e no Step#10, no Equip#A01, entre w202108 - w202120	40
Figura 23 - Diagrama de Ishikawa para o excesso de Speed Loss na máquina Equip#A01	41

Figura 24 - Evolução do Oversampling nas primeiras vinte semanas de 2021, em equipamentos da família A	42
Figura 25 - Análise de Pareto ao Oversampling por produto, na família A, nas primeiras vinte semanas de 2021	42
Figura 26 - Oversampling acumulado por equipamento em cada uma das primeiras vinte semanas do ano, relativo aos produtos Prod#01, Prod#02, Prod#19, Prod#03, Prod#08, Prod#32, Prod#46, Prod#05 e Prod#48	43
Figura 27 – Representação de parte da tabela com a distribuição do número de horas em Oversampling, por produto e por semana, em equipamentos da família A, nas semanas w202101 a w202120	44
Figura 28 - Diagrama de Ishikawa para o Oversampling elevado	45
Figura 29 - Evolução do tempo acumulado em Wafer Reprocessing, em equipamentos da família A, ao longo das primeiras vinte semanas de 2021	46
Figura 30 – Representação de parte da tabela com a distribuição do número de horas acumuladas em Wafer Reprocessing, por produto e por semana, para equipamentos da família A	47
Figura 31 - Análise de Pareto ao tempo acumulado em Wafer Reprocessing por produto, num conjunto de equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021	47
Figura 32 - Análise 5 Why ao excesso de tempo acumulado a reprocessar wafers, em equipamentos da família A	48
Figura A-1- Atribuição do estado nos três níveis da ferramenta	56
Figura B-1- Visão geral de alguns equipamentos da família B, entre as semanas w202117 e w202120	57
Figura B-2 - Visão geral de alguns equipamentos da família C, entre as semanas w202117 e w202120	58
Figura B-3 - Visão geral de alguns equipamentos da família D, entre as semanas w202117 e w202120	58
Figura C-1 - Fluxograma da utilização normal da ferramenta	59
Figura C-2 - Diagrama com as diferentes bases de dados utilizadas.....	60
Figura D-1 - Detalhe da utilização semanal dos equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021	61
Figura D-2 - Detalhe da repartição dos componentes que afetam o OEE, nos equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021	61
Figura D-3 - Detalhe da ocupação em cada estado e dos termos do OEE para a família A, nas semanas w202101 a w202120	62
Figura D-4 - Visão geral do conjunto de equipamentos da família A, ao longo das primeiras vinte semanas de 2021, imagem ampliada	63
Figura D-5 - Gráfico com a utilização mensal de equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021	64
Figura D-6 - Gráfico com a utilização semanal dos equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021	64

Figura D-7 - Gráfico com a utilização diária dos equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021.....	64
Figura D-8 - Gráfico com a utilização por equipamento da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021.....	65
Figura D-9 - Relatório de comparação de dois períodos de tempo, exemplo para a família A, nas semanas w202119 e w202120.....	65
Figura D-10 - Exemplo de parte da tabela dinâmica gerada para análise do Failed Processing, para a família A, relativa às primeiras vinte semanas de 2021.....	66
Figura D-11 - Exemplo de parte da tabela dinâmica gerada para análise do Failed Processing para o Prod#03, expandida para os diferentes steps	66
Figura D-12 - Exemplo de parte da tabela dinâmica gerada para análise do Failed Processing, com a semana w202113 expandida para os diferentes equipamentos.....	66
Figura D-13 - Gráfico com a evolução do tempo acumulado por semana no estado Failed Processing, para a família A, entre as semanas w202101 e w202120	67
Figura D-14 - Relatório de análise do Speed Loss - Análise por equipamento.....	68
Figura D-15 – Distribuição do Speed Loss acumulado por equipamento, para uma família, entre w202101 e w202120.....	69
Figura D-16 - Evolução do Speed Loss acumulado para o equipamento escolhido, nas primeiras vinte semanas de 2021	69
Figura D-17 – Distribuição do Speed Loss acumulado, por produto, para o equipamento selecionado, entre as semanas w202101 e w202120	69
Figura D-18 - Evolução temporal do Speed Loss acumulado de um produto, no equipamento selecionado	70
Figura D-19 - Distribuição do Speed Loss acumulado por step, no produto e no equipamento escolhidos, e indicação do número de wafers processadas	70
Figura D-20 - Evolução temporal do Speed Loss acumulado, por step, para o produto e equipamentos selecionados	70
Figura D-21 - Relatório de análise do Speed Loss - Análise por produto.....	71
Figura D-22 - Distribuição do Speed Loss acumulado por produto, para uma família, entre w202101 e w202120.....	72
Figura D-23 - Evolução do Speed Loss acumulado para o produto escolhido, nas primeiras vinte semanas de 2021	72
Figura D-24 - Distribuição do Speed Loss acumulado por equipamento, para o produto escolhido.....	72
Figura D-25 - Evolução do Speed Loss acumulado em cada equipamento, para o produto selecionado	72
Figura D-26 - Gráfico com o número de wafer-step processados, e número de reprocessamentos, por produto, numa semana, para uma família de equipamentos	73
Figura D-27 - Gráfico com o número de wafer-step processados, e número de reprocessamentos, para um produto, por step, numa semana, para uma família de equipamentos	73

Figura D-28 - Gráfico com o número de wafer-step processados, e número de reprocessamentos, para um produto, para um step, por equipamento, numa semana	73
Figura D-29 - Evolução do Speed Loss acumulado diariamente, no Equip#01 e para os produtos Prod#03, Prod#07, Prod#08, Prod#32, Prod#44, Prod#46 e Prod#48, nas semanas w202108 - w202120	74
Figura E-1 - Relatório com a distribuição dos processamentos e reprocessamentos para o Prod#03, por step.....	75
Figura E-2 - Relatório com a distribuição dos processamentos e reprocessamentos para o Prod#03, nos Step#08, Step#26 e Step#32, por equipamento	76
Figura E-3 - Relatório com a distribuição dos processamentos e reprocessamentos para o Prod#42, por step.....	76
Figura E-4 - Relatório com a distribuição dos processamentos e reprocessamentos para o Prod#42, no Step#32, por equipamento	77
Figura F-1 - Menu de seleção do produto, step e ponderação dos diferentes equipamentos e meses, para a estimativa do RTT.....	78
Figura F-2 - Exemplo do gráfico apresentado com a evolução temporal do RTT para o(s) produto(s) e step(s) selecionados.....	79
Figura F-3 - Exemplo do gráfico apresentado com a evolução temporal do RTT para o(s) produto(s) e step(s) selecionados - sem os outliers encontrados anteriormente.....	79
Figura G-1- Dois métodos para o cruzamento de dados com o CERBERUS - caso mais simples	80
Figura G-2 - Dois métodos para o cruzamento de dados com o CERBERUS - caso mais comum	81
Figura G-3 - Comparação dos resultados apresentados pela ferramenta nos dois métodos, com os do CERBERUS, para a família A, no mês de março.....	81

Índice de Tabelas

Tabela A-1 - Principais transações e equipamentos que as suportam	54
Tabela A-2 - Quadro resumo com os estados dos equipamentos	55
Tabela A-3 - Tabela representativa da utilizada no ficheiro de análise, adaptada e com os dados para uma hora de funcionamento da família A.....	56

1 Introdução

O presente documento foi elaborado no âmbito do projeto de dissertação desenvolvido em ambiente empresarial na ATEP – Amkor Technology Portugal, S.A., enquadrando-se na Unidade Curricular de Dissertação, presente no plano de estudos do segundo semestre, do quinto ano do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O projeto de dissertação teve uma duração de dezoito semanas e foi realizado em registo misto, parte presencial, parte à distância, dadas as restrições impostas pela pandemia do Covid-19 e pelo estado de emergência no país vigente durante grande parte deste tempo. A componente presencial foi realizada nas instalações da ATEP em Vila do Conde, no Departamento de Planeamento da empresa. No presente capítulo é realizada uma apresentação da empresa e do projeto, iniciando pelo enquadramento do mesmo e motivação, referindo de seguida os objetivos do projeto e a metodologia abordada, e finalizando com a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A produção de semicondutores é uma das indústrias de mais rápido crescimento, capital intensivo e direcionada para a tecnologia do mercado, com processos produtivos complexos. O planeamento eficaz e a análise da capacidade disponível são desafios cruciais para a equipa de capacidade, dentro do Departamento de Planeamento (Wang, Chu, and Lin 2019). Esta é uma indústria onde a taxa de utilização do capital da empresa tem uma influência considerável sobre a eficácia da capacidade e o produto final (Chien, Dou, and Fu 2018). De forma a maximizar a utilidade para uma produção inteligente e melhorar a eficácia da cadeia de abastecimento, o planeamento estratégico do portfólio de capacidade deve coordenar a expansão da capacidade com as opções de migração e redistribuição de recursos (Chien, Dou, and Fu 2018). O célere desenvolvimento da tecnologia nos semicondutores dificulta a previsão, por parte das empresas, das necessidades de utilização, especialmente no planeamento de novos produtos (Chien, Dou, and Fu 2018).

As áreas de Planeamento e Capacidade são fulcrais para o bom funcionamento de uma empresa numa indústria tão rigorosa e complexa como é a indústria de semicondutores. Para garantir o suporte necessário às atividades desenvolvidas nestas áreas, é essencial disponibilizar informação de qualidade relativa ao funcionamento dos diversos equipamentos. Surge, desta forma, a necessidade de desenvolver uma ferramenta que permita analisar a capacidade de produção dos equipamentos, através da determinação da utilização dos mesmos e do cálculo de índices de *performance* relevantes, de forma correta, automática e eficaz. Pretende-se, assim, fornecer informação relevante como suporte no momento de tomada de decisões, e facilitar a interpretação dos dados obtidos, por meio de relatórios simples, dinâmicos e completos.

A análise à utilização dos equipamentos, necessária e regular, era realizada de forma trabalhosa e manual. A considerável dimensão dos dados que eram tratados tornou imperativo que a eficiência da ferramenta a desenvolver fosse uma das características mais relevantes em todos

os momentos do seu desenvolvimento, para evitar tempos de processamento demasiado elevados. Outra característica importante era a compatibilidade com o maior número de equipamentos possível, para poder utilizar esta ferramenta de monitorização de forma transversal às centenas de equipamentos no parque da empresa, agrupados em dezenas de grupos, ou famílias, diferentes.

Os principais resultados a extrair desta análise estão relacionados com a distribuição da utilização dos equipamentos nos estados produtivos definidos. Procura-se definir um maior conjunto de estados, para classificar o funcionamento da máquina de forma mais congruente com a realidade. Antes da implementação da ferramenta desenvolvida, todo o tempo em que a máquina estava a funcionar era classificado como produtivo, o que leva a uma medida enviesada, por excesso, do tempo em que as máquinas estão a processar produtos realmente produtivos. Uma categorização mais pormenorizada permite desenvolver mais facilmente uma análise posterior para a resolução dos problemas identificados. Outro objetivo da ferramenta é a computação de forma mais correta do *Raw Tool Time* (RTT), para estudar o tempo de cadência dos diferentes produtos.

Um aspeto a salientar é que a análise da capacidade produtiva parte de um estudo dos equipamentos ao nível do processamento das *wafers* e não dos lotes, como é o mais comum encontrar na literatura e casos de estudo na área de semicondutores – motivo pelo qual as definições de RTT encontradas são para o processamento de lotes, por exemplo. Esta opção aumenta bastante a complexidade da ferramenta, mas permite obter muito mais informações sobre o real funcionamento dos equipamentos e depois realizar análises muito mais profundas.

1.2 O projeto de análise da capacidade produtiva na ATEP

O grupo Amkor Technology, Inc. é uma *Outsourced Semiconductor Assembly and Test* (OSAT), uma empresa de *packaging* e de teste da indústria de semicondutores. Comprometida com um nível de serviço extremamente elevado, engenharia especializada e excelência na produção de elevado volume, tem instalações na América do Norte, Ásia e Europa (Amkor Technology 2021a). Com o nome ATEP, está presente em Portugal desde 2017, onde são realizadas nas instalações de Vila do Conde operações diversas, desde a produção, passando pelo departamento de vendas e ainda funcionando como centro de suporte (Amkor Technology 2021b).

Numa era de transformação digital, inteligência artificial e comunicações 5G, e onde aplicações como realidade virtual ou aumentada, a *Internet of Things* (IoT), sistemas de Indústria 4.0 e veículos autónomos estão-se a tornar uma realidade a nível comercial, a indústria de semicondutores é vista como um fator crítico para a competitividade e segurança nacional de um país. Tudo isto ajuda a compreender o crescimento da capacidade produtiva global, estimado em mais de 50% na presente década, entre 2020 e 2030 (Varas et al. 2020). As unidades industriais de produção de semicondutores, em inglês, *fabs*, são os sistemas produtivos mais complexos e com mais elevado grau de automatização (Khakifirooz, Chien, and Chen 2018). Os equipamentos e processos são utilizados para produzir circuitos integrados, por meio de um conjunto alargado de processos complexos e extensos. Esta complexidade e extensividade deve-se a um número de fatores: os processos produtivos são rigidamente controlados, podem ocorrer ciclos no fluxo produtivo, com as *wafers* a voltar a entrar no mesmo, os equipamentos utilizados são complexos e avançados, e os prazos são exigentes devido à procura imprevisível de uma combinação de produtos cada vez maior (Espadinha-Cruz, Godina, and Rodrigues 2021).

No ano de 2017 a Amkor Technology, Inc. adquiriu a empresa portuguesa NANIUM S.A. com o objetivo de fortalecer a posição no mercado de encapsulamento ao nível de *wafer* para dispositivos como smartphones e tablets, mercado que está em crescimento. A NANIUM era uma empresa de nível mundial, especializada em soluções de encapsulamento de semicondutores em *wafer-level fan-out* (WLFO), que tinha desenvolvido uma tecnologia de WLFO de alto rendimento e fiável, o que permitiu atingir um volume de produção de quase um milhão de milhão de produtos, *packages*, WLFO a partir da sua linha de produção de elevada qualidade (Amkor Technology 2017).

No Departamento de Planeamento da ATEP, em específico na área da Capacidade, existe interesse em desenvolver uma ferramenta fiável, útil e prática, que permita dar suporte à análise da capacidade produtiva de vários conjuntos de equipamentos da fábrica. O projeto visa o desenvolvimento desta ferramenta e a sua utilização para estudar e atuar em casos práticos de oportunidades de melhoria.

1.3 Objetivos do projeto

O principal objeto de estudo deste projeto é o desenvolvimento de uma ferramenta de tratamento de dados, de forma automática e correta, para determinar a repartição da utilização de cada equipamento nos diferentes estados produtivos, e assim avaliar a capacidade produtiva destes equipamentos. Esta ferramenta terá de ser suportada por uma definição teórica dos estados produtivos, em termos de conceito e metodologia de cálculo, para uma melhor compreensão dos resultados apresentados. O foco do projeto vai estar, no início, em equipamentos da área de metrologia, mas pretende-se tornar transversal a utilização desta ferramenta a todas as famílias de equipamentos da fábrica. Com a correta utilização de cada equipamento determinada, pretende-se monitorizar a evolução da utilização e realizar análises que permitam aprofundar os problemas que sejam identificados.

Para a ferramenta, os principais objetivos são: definir de forma clara e inequívoca os diferentes estados que podem caracterizar o equipamento num dado momento; desenvolver a ferramenta em EXCEL e combinar informação de diferentes bases de dados; ter a capacidade de armazenar, sem a necessidade de recalcular, os dados históricos de análises anteriores e combinar com estes os dados mais recentes; garantir um elevado grau de automação, eficiência e robustez dos resultados; assegurar facilidade de uso e apresentar uma boa interface com o utilizador.

1.4 Método seguido no projeto

Para alcançar de forma efetiva e eficiente os objetivos traçados para o projeto, o método seguido foi o que se passa a apresentar. Começou-se com um estudo do processo produtivo das etapas desenvolvidas na fábrica para os diferentes tipos de produtos, assim como da linha de produção. No passo seguinte foi analisado o estado em que a informação era disponibilizada e obtida, antes da integração da ferramenta desenvolvida, e o processo de extração e tratamento dos dados. O objetivo desta etapa é identificar potenciais pontos de melhoria, funcionalidades a desenvolver, resultados a apresentar e eventuais limitações de implementação.

Posteriormente, foi definida a forma de cálculo da cadência produtiva, assim como as fórmulas utilizadas no cálculo dos restantes indicadores e a definição dos estados possíveis que poderiam ser atribuídos ao funcionamento da máquina em cada momento. Esta definição dos nomes a atribuir a cada estado para sua mais correta identificação foi realizada tendo em conta a nomenclatura utilizada na empresa, através de reuniões entre diferentes departamentos, e os nomes mais comumente utilizados na literatura, na área de Planeamento e Capacidade. Foram analisadas as definições presentes em normas e aprofundadas em artigos, mas é interessante ir além destas, no sentido de chegar a um maior grau de detalhe, sem as desrespeitar.

Numa terceira etapa, foi desenvolvida a ferramenta *per si*, num processo iterativo de adição e remoção de funcionalidades, com uma regular validação dos resultados, por comparação com as ferramentas previamente utilizadas, e através do *input* da equipa de Capacidade relativamente a cada desenvolvimento. Esta etapa terminou com a apresentação da versão final da ferramenta e com uma nova visita ao *Gemba*¹ para validar os resultados obtidos.

Posto isto, a etapa seguinte passou por desenvolver e implementar os planos de ação para alguns dos pontos identificados, sempre em contacto próximo com os departamentos relevantes para a ação a realizar. Com a ferramenta operacional, recorreu-se à utilização da mesma para identificar, em conjugação com algumas ferramentas de *Lean Manufacturing* e de Qualidade, pontos de melhoria nos diferentes equipamentos de metrologia, e nos diferentes *steps* produtivos, com o intuito de estabelecer um plano de ação para dar resposta aos pontos encontrados. Após a implementação destas ações, foram levantados dados para avaliar o grau de sucesso de ações tomadas e da utilização da ferramenta.

1.5 Estrutura da dissertação

O relatório de dissertação encontra-se organizado em seis capítulos.

O primeiro tem por objetivo servir de introdução, apresentando tanto o projeto como a empresa de forma sucinta.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos assuntos abordados no projeto, aprofundando os diferentes termos, conceitos, metodologias e processos que são componentes integrantes deste projeto.

No terceiro capítulo é apresentado um estudo pormenorizado do estado atual do processo produtivo, em especial, na área de planeamento de capacidade, e mais especificamente, na forma de tratamento e análise de dados. Ainda neste capítulo, é explicado o processo produtivo na indústria de semicondutores, com especial enfoque na área de metrologia.

O Capítulo 4 trata o núcleo do projeto, o desenvolvimento da ferramenta que se propõe a dar resposta aos problemas encontradas e atingir os objetivos da presente dissertação. Neste capítulo são mencionadas as iterações mais relevantes, o funcionamento da ferramenta e o modo utilização da mesma, os resultados que esta apresenta e termina com uma comparação com a informação que estava disponível antes deste projeto.

No Capítulo 5, são identificados os pontos de melhoria na utilização dos equipamentos, definidos planos de ação sobre os mesmos e é abordada a implementação destes planos, seguindo as metodologias abordadas ao longo do curso.

Finalmente, no sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões relativas ao projeto apresentado, assim como propostas de trabalhos futuros a desenvolver nesta área.

¹ *Gemba*: termo japonês que significa “o sítio real”. Na área de negócios, é utilizado para se indicar ao local onde o valor é criado e na manufatura refere-se à área de produção, ou linha de produção. (Nestle 2013)

2 Revisão Bibliográfica

Neste Capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica sobre os temas de planeamento de capacidade, análise da *performance* de equipamentos, com maior atenção para a indústria de semicondutores, e ainda de algumas técnicas de deteção de oportunidades de melhoria e respetiva intervenção.

2.1 Planeamento de capacidade

No contexto de produção, a capacidade é definida como a taxa máxima de produção e a aptidão para absorver produção. O planeamento da produção trata a definição de todos os recursos e fatores que afetam a capacidade de um fabricante produzir algo, pelo que inclui os equipamentos, a mão-de-obra, o espaço e o tempo. O produto de um planeamento de capacidade é um plano de utilização de recursos e uma estratégia de investimentos, que têm por base políticas ótimas que tentam dar resposta à procura e às suas variações, tendo sempre em consideração os objetivos e restrições das diferentes partes que integram a empresa (Elmaraghy et al. 2014).

O planeamento de capacidade pode ser definido como o processo de determinação da quantidade de capacidade necessária para produzir no futuro. Este processo pode ser realizado ao nível de uma linha de produto ou para um agregado destas. No caso de um agregado, corresponde ao planeamento das necessidades de recursos. Pode também ser efetuado ao nível do planeamento mestre – *master-planning* -, isto para planeamento de capacidade bruta (SME 2019). No projeto, dentro do tema de planeamento de capacidade, apenas foi estudado o vetor equipamento, sendo que outros, como as necessidades em termos de mão-de-obra, por exemplo, são temáticas centrais para o planeamento, mas que não se encontram no âmbito do projeto.

Em linha com o foco da indústria de semicondutores na melhoria contínua, a procura pela redução do tempo de ciclo dos produtos e pelo aumento da cadência produtiva dos equipamentos são metas de elevada relevância. Desta forma, a identificação e a quantificação das perdas de velocidade de produção – doravante referidas pela expressão inglesa, *speed loss* – nas suas corretas categorias permite identificar pontos de ação e traçar planos para atacá-los. Estas ações têm um impacto direto na capacidade global e *performance* em termos de cadência produtiva dos equipamentos (Foster et al. 2008).

2.2 Análise da *performance* de equipamentos

2.2.1 *Total Productive Maintenance* (TPM)

O conceito de TPM – *Total Productive Maintenance*, em português, Manutenção Produtiva Total – foi introduzido em 1971, no Japão, e é uma estratégia para aumentar a eficácia dos ambientes produtivos, especificamente através de atividades para aumentar a eficácia dos equipamentos (Leitão, Almada-Lobo, and Guimarães 2019). A TPM tem por objetivo melhorar as condições de instalações fabris já existentes e aumentar o conhecimento e capacidades do pessoal na linha de produção, para alcançar o alvo de zero acidentes, zero defeitos e zero avarias (Gotoh 1999).

A TPM trata-se de uma metodologia que permite uma melhoria rápida e contínua do processo produtivo, através do envolvimento e da atribuição de poder aos funcionários, e de uma medida dos resultados em ciclo fechado (Leitão, Almada-Lobo, and Guimarães 2019). A implementação desta metodologia tem diversas vantagens, nomeadamente, a diminuição do tempo de manutenções não planeadas, aumento da produtividade e da eficiência, melhor economia na produção, aumento da satisfação dos clientes, maior lealdade e autoestima dos trabalhadores através de uma maior envolvimento e maior responsabilidade, áreas de trabalho arrumadas, limpas e ordenadas, entre outras (Tayal and Singh Kalsi 2020).

2.2.2 *Overall Equipment Effectiveness* (OEE)

Em português, o índice de Rendimento Operacional Global, é um rácio entre a quantidade real de bons produtos produzidos – no caso da indústria de semicondutores, *wafers* em conformidade com as especificações – e a quantidade que poderia ter sido produzida, a um ritmo estável, durante um determinado horizonte temporal (Foster et al. 2008).

O OEE é uma métrica da *performance* de equipamentos, proposta em 1988 por Seiichi Nakajima, sendo vista como uma das melhores métricas de boas práticas para a avaliação dos resultados obtidos pela implementação de atividades de TPM e também de *Lean* (Cheah, Prakash, and Ong 2020). O OEE pode ser integrado com outras técnicas e ferramentas de melhoria contínua e é eficaz para identificar os processos gargalo (Prasetyo and Veroya 2020), por comparação do valor desta métrica entre os diferentes grupos de equipamentos numa fábrica. Esta métrica serve de suporte para analisar o resultado estratégico de uma implementação de TPM ao medir o grau de eliminação de desperdício, que é o principal objetivo da produção *Lean*. O OEE é definido como o produto de três termos mutuamente exclusivos: disponibilidade, *performance* e qualidade, de acordo com a Equação (1) (Cheah, Prakash, and Ong 2020).

$$OEE = Disponibilidade \times Performance \times Qualidade \quad (1)$$



Figura 1 - Diagrama com as Seis Grandes Perdas em TPM, adaptado de (Leitão, Almada-Lobo, and Guimarães 2019)

Associadas às três componentes que compõem o OEE, existem três categorias de perdas que são: Perdas de Disponibilidade – *Downtime* -, Perdas de *Performance* – *Speed Losses* – e Perdas de Qualidade – *Defect Losses*. Estas três categorias de perdas agrupam os seis grandes tipos de perdas (Leitão, Almada-Lobo, and Guimarães 2019), como apresentado no diagrama da Figura 1.

2.2.3 Speed Loss

A *Speed Loss* é uma perda de *performance* em que o equipamento está em funcionamento, mas não à velocidade máxima projetada. Esta perda pode ser motivada por dois fatores, pequenas paragens ou inatividade – em inglês, *idling* –, ou por operação a velocidade reduzida (Leitão, Almada-Lobo, and Guimarães 2019).

2.2.4 Raw Tool Time (RTT)

O RTT é o tempo que um lote está a ser processado, num dado equipamento ou ferramenta, e, especificamente para indústria de semicondutores, é medido a partir do momento que a primeira *wafer* é retirada da *FOUP*² e última do lote volta a ser colocada na *FOUP* (Foster et al. 2008).

Esta definição permite estabelecer o RTT para o lote, mas, no presente projeto, irá ser realizada uma adaptação para calcular o tempo de cadência de cada *wafer* como o valor do RTT. O RTT é, normalmente, definido para um lote devido aos tempos de inicialização e término de processamento do lote. A opção de definir o RTT por *wafer* permite obter uma medição do tempo efetivo de processamento e aumentar o número de observações, de forma a ter mais informação disponível. O RTT toma o valor da duração do processamento, entre o início e o fim, caso o equipamento esteja a processar apenas uma *wafer* de cada vez. No caso de ter mais do que uma *wafer* a processar em simultâneo, o RTT fica definido como o tempo entre o fim do processamento da *wafer* anterior e o fim do processamento da *wafer* atual.

2.2.5 Norma SEMI E10

A norma “SEMI E10 *Specification for Definition and Measurement of Equipment Reliability, Availability, and Maintainability (RAM)*” foi publicada pela primeira vez em 1986 e é considerada como a base das métricas de *performance* e produtividade (Pomorski n.d.).

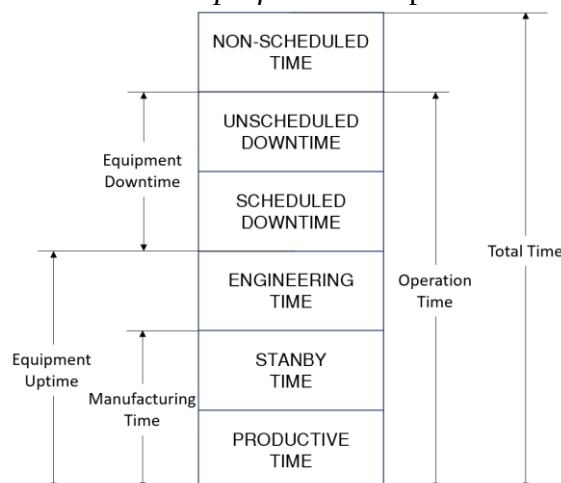


Figura 2 - SEMI E10 - Os seis estados básicos e suas agregações, adaptado de (Pomorski n.d.)

² *Front Opening Unified Pod* (FOUP): dispositivo plástico desenvolvido para transportar *wafers* num ambiente controlado e de forma segura entre os diferentes equipamentos na linha de produção.

São estabelecidos seis estados básicos de equipamentos, apresentados na Figura 2, assim como as suas agregações. É possível obter maior visibilidade e uma maior resolução da operação dos equipamentos através da criação de subestados que remetem para os seis básicos, o que facilita a aplicação desta norma a casos práticos, com condições de operação e objetivos de *performance* específicos, sempre em conformidade com os estados básicos da SEMI E10 (Pomorski n.d.). Esta norma fornece a informação de base de *performance* dos equipamentos, sendo utilizada para análise da capacidade e gestão de restrições. Fornece, também, a informação que suporta métricas de *performance* a níveis mais elevados, como o Custo de Posse, definido na norma SEMI E35, a Produtividade a Nível de Fábrica, definida na norma SEMI E124 e o índice de Rendimento Operacional Global (OEE), definido na norma SEMI E79 (Pomorski n.d.).

A interligação entre as normas SEMI E10 e SEMI E79, detalhada na Figura 3, permite obter informação da permanência em cada estado, essencial para o cálculo das métricas de *performance* dos equipamentos utilizadas no OEE. É então possível identificar oportunidades de melhoria e realizar o acompanhamento das atividades de melhoria relativas às oportunidades identificadas (Pomorski n.d.).

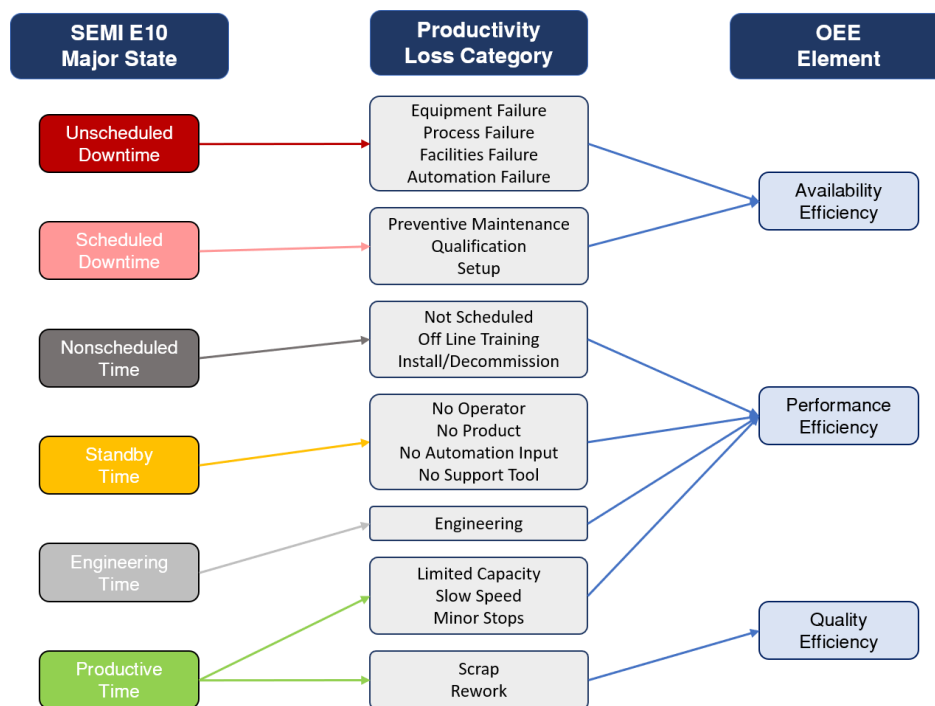


Figura 3 - Diagrama de relação entre os estados da norma SEMI E10 com a SEMI E79, adaptado de (Pomorski n.d.)

2.3 Lean Manufacturing

Lean Manufacturing é uma abordagem de manufatura multifacetada que engloba uma variedade de práticas industriais com o objetivo de identificar as operações de valor acrescentado, do ponto de vista do cliente, e que permitem um fluxo destes processos ao longo da organização, à medida que são puxados pelos clientes (Sanders, Elangeswaran, and Wulfsberg 2016). Este conceito foi desenvolvido por Taichii Ohno na Toyota Motor Company, no seio do Toyota Production System, focado na criação de um fluxo estável de processos para produzir os bens para consumo, a um ritmo marcado pelos clientes, com pouco ou nenhum desperdício (Sanders, Elangeswaran, and Wulfsberg 2016).

As diferentes dimensões de *Lean Manufacturing* podem ser agrupadas em quatro fatores (Sanders, Elangeswaran, and Wulfsberg 2016):

- Fatores relacionados com o Fornecedor;
- Fatores relacionados com o Cliente;
- Fatores relacionados com o Processo;
- Fatores Humanos e de Controlo.

2.3.1 Análise “5-Whys”

A análise “5-Whys” é uma técnica para determinar a causa raiz de um problema e consiste em colocar cinco, ou mais, vezes a questão: “Porque é que a falha ocorreu?”. De cada vez que se obtém uma resposta para uma pergunta, deve-se colocar a questão do porquê de essa condição particular ter ocorrido (Harrington and Frank 2016).

Esta análise é uma das ferramentas mais populares do *Lean Manufacturing* e tem por base uma ideia bastante simples: ao colocar a questão “Porquê?” é possível separar os sintomas da causa de um problema. Esta separação é importante, uma vez que os sintomas muitas vezes mascaram as verdadeiras causas dos problemas. A utilização correta e eficaz da técnica de análise dos “5-Whys” permite determinar a causa-raiz de qualquer não-conformidade e, desta forma, possibilita às empresas o desenvolvimento de atividades de correção e, possivelmente, prevenção a longo prazo destas não-conformidades (Benjamin, Marathamuthu, and Murugaiah 2015).

A possível integração desta técnica para atacar desperdícios, perdas e atividades sem valor acrescentado do OEE, e reduções da qualidade no processo produtivo, é um tema muito pouco explorado, mas que apresenta bons resultados em problemas reais (Benjamin, Marathamuthu, and Murugaiah 2015).

Uma das principais dificuldades desta análise é que nem sempre é possível determinar as causas raiz, visto que pode ter uma infinidade de razões para que surja este problema, ou, por outro lado, não haver conhecimento suficiente para responder com o rigor exigido às questões colocadas. O método utilizado nesta análise também tem como problema o facto de estabelecer a seguinte hipótese: cada sintoma só tem uma causa. Ora, esta hipótese simplificativa, que permite uma análise direta, nem sempre é verdadeira, o que limita a aplicabilidade desta análise (Harrington and Frank 2016).

2.3.2 Ciclo PDCA

O ciclo Plan-Do-Check-Act (PDCA) é um modelo utilizado em processos de melhoria contínua. Este ciclo é composto por quatro etapas, como demonstrado na Figura 4, para implementar mudanças e atingir melhorias (Corinne Johnson 2016).

A primeira etapa é Planear – *Plan* – e, nesta etapa, a oportunidade de melhoria é identificada e define-se um plano de ação, depois de analisar o problema. Na etapa seguinte, Agir – *Do* –, são desenvolvidas e posteriormente implementadas as soluções para o problema, de acordo com o que tinha sido planeado. Na terceira etapa, Verificar – *Check* –, avalia-se os resultados das soluções introduzidas. Na quarta etapa do ciclo, Agir – *Act* –, são tomadas ações com base nos resultados da etapa de verificação. Se as alterações forem positivas, a solução é implementada num panorama mais abrangente, senão, reinicia-se o ciclo com um novo plano (Corinne Johnson 2016).

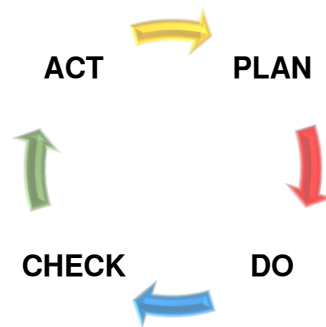


Figura 4 - Ciclo PDCA, adaptado de (A. Faria 2020)

Os programas de melhoria contínua nas empresas são compostos por um grande número de pequenos projetos, sendo que cada um destes projetos pode ser gerido de acordo com o ciclo PDCA (A. Faria 2020).

2.4 Sete Ferramentas Básicas da Qualidade

As sete ferramentas básicas de qualidade são meios disponíveis para produzir alterações, fáceis de aprender e de utilizar, e são empregues para analisar soluções para problemas existentes (Soković et al. 2009).

As sete ferramentas básicas da qualidade são: histogramas, cartas de controlo, folhas de verificação - estas três utilizadas principalmente para aquisição de dados -, diagramas de causa e efeito – também conhecidos como diagramas de Ishikawa -, diagramas de dispersão, fluxogramas e diagramas de Pareto, utilizados para análise dos dados recolhidos (Soković et al. 2009). As sete ferramentas básicas da qualidade foram introduzidas por Karou Ishikawa, na década de 1960 (Soković et al. 2009).

Destas sete ferramentas, será dada especial atenção à Análise de Pareto e ao Diagrama de Ishikawa por serem as ferramentas escolhidas para analisar as perdas de disponibilidade, de forma similar à opção tomada por Tayal et al. (2021). Também de acordo com Tayal e Singh Kalsi (2020), a identificação de causas para falhas pode ser facilitada por meio de uma abordagem híbrida que envolva Análises de Pareto e Diagramas de Ishikawa. Estas duas ferramentas expõem o progresso da procura das causas prováveis e permitem categorizar falhas individuais em causas mais profundas.

2.4.1 Análise de Pareto

A Análise de Pareto é uma ferramenta de suporte que pode ser utilizada para investigar as perdas relacionados com o OEE. Esta ferramenta também pode auxiliar na identificação de causas para os diagramas de Ishikawa a desenvolver. A Análise de Pareto também é conhecida como “Análise 80/20” uma vez que, regra geral, cerca de 80% dos proveitos – ou efeitos, perdas no caso específico em estudo – se podem atribuir a 20% dos produtos – ou causas. Esta análise tem por base a desigualdade entre dois parâmetros, os resultados operacionais e a prosperidade económica. Para desenvolver esta análise, é traçado um gráfico de barras a partir dos dados recolhidos, onde, no eixo horizontal, estão as causas - para as perdas, neste caso - ordenadas por ordem decrescente – em termos de número de horas. Depois, num gráfico com um eixo vertical diferente e partilhando o eixo horizontal, sobreposto ao de barras, é traçada uma linha com contribuição acumulada, em percentagem, das causas identificadas. Assim é possível separar as causas de acordo com a sua importância (Tayal et al. 2021). Neste caso de estudo será dada especial atenção as causas que são responsáveis pelas perdas de disponibilidade, medidas em horas.

2.4.2 Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa utiliza uma representação ilustrativa das causas e efeitos para analisar um problema. Este diagrama é uma ferramenta eficaz para estudar a constituição de um problema em virtude da sua aparência gráfica. O diagrama é constituído por ramos principais e ramos secundários, de forma idêntica à espinha de um peixe, que explicitam as relações entre as causas e os efeitos. Para cada causa tem de haver um efeito representado, e vice-versa (Tayal et al. 2021).

A construção do Diagrama de Ishikawa segue uma estrutura lógica, que se apresenta de seguida:

- O problema em análise é colocado no lado direito do diagrama e as setas utilizadas para contruir o esqueleto devem apontar para a direita;
- As causas efetivas do problema – o método, a mão-de-obra, o material, a máquina, a medida e o meio-ambiente – são diretamente apontadas à coluna vertebral;
- Estas causas principais precisam de ser aprofundadas e as causas consequentes são tratadas como espinhas intermédias e cada causa representa apenas uma espinha;
- Uma causa é aprofundada ao máximo e os vários ramos que surjam podem ser incluídos lateralmente no esqueleto através de espinhas médias e de espinhas mais pequenas (Tayal et al. 2021).

2.5 Análise *Drill-Down*

Um primeiro passo na análise de dados é, normalmente, a exploração dos dados de forma interativa para desenvolver uma primeira impressão dos tipos de variáveis na análise e das suas possíveis relações. Dentro do campo de *data mining*³, o conceito de análise *drill-down* é aplicado como o método de exploração interativa dos dados, armazenados em grandes bases de dados. O processo de análise interativa começa por considerar alguma repartição simples dos dados num conjunto de variáveis de interesse. Para cada grupo de variáveis, pode-se calcular diversas estatísticas relevantes, construir tabelas, histogramas e sumários gráficos para as variáveis. De seguida, para cada categorização dos dados, é possível aprofundar o estudo – *drill-down* – para expor e analisar mais pormenorizadamente esses dados. A principal vantagem desta análise é a pluralidade de resultados que podem ser automaticamente atualizados ao longo da exploração interativa de *drill-down* (Nemeth and Michalconok 2017).

A análise *drill-down* começa com uma pergunta de alto nível – que, aplicando ao caso de estudo do presente relatório, pode ser “Qual o equipamento com pior *performance* em termos de *Speed Loss*?”. Depois desta questão inicial, a análise vai sucessivamente aprofundando com perguntas mais detalhadas – retomando o exemplo, uma pergunta subsequente pode ser “Quais os produtos que mais contribuem para a fraca *performance* do equipamento, em termos de *Speed Loss*?” (Carlile and Division 1996). O objetivo desta análise é chegar ao cerne da questão que tem vindo a ser desenvolvida, de forma a convergir para a singularização das causas raiz do problema.

³ *Data Mining* pode ser definido como o processo de extração não-trivial de informação implícita, previamente desconhecida e potencialmente útil a partir de um conjunto de dados provenientes de uma base de dados. É também apelidado de descobrimento de conhecimento em bases de dados (Chen, Han, and Yu 1996).

3 Descrição da Situação Atual

Neste terceiro capítulo é apresentado e analisado o estado da empresa, concretamente dentro do departamento alvo de estudo, na fase inicial, antes de qualquer intervenção referida neste relatório. É descrita a informação disponível aos elementos do Departamento de Planeamento, em termos de nível, de precisão e de disponibilidade. São ainda apresentadas com maior detalhe algumas etapas do processo produtivo, especificamente na área de metrologia, que serão alvo de intervenções descritas em capítulos posteriores.

3.1 A Indústria de Semicondutores

Retomando o tema introduzido no primeiro capítulo, na indústria de produção de semicondutores, os equipamentos de produção são a parte mais importante de toda a fábrica (Ma, Zhang, and Zhang 2018). Estes equipamentos envolvem, por norma, investimentos avultados e têm elevados custos de mão-de-obra na sua manutenção. Por estes motivos, a maior preocupação das fábricas de semicondutores reside na procura de aumentar a *performance* dos seus equipamentos, melhorar a sua produtividade e rendimento, e reduzir o número de *wafers* que deixam de ser vendáveis (Ma, Zhang, and Zhang 2018).

3.2 Semicondutores e Processo Produtivo - eWLB

Os semicondutores são um grupo de materiais que possuem uma condutividade elétrica entre a dos materiais condutores, como os metais, e a dos isolantes. Existem duas classificações gerais de semicondutores: materiais semicondutores elementares e materiais semicondutores compósitos. Os materiais elementares são compostos por átomos de um único elemento químico, Silício ou Germânio. O semicondutor mais utilizado em circuitos integrados – *Integrated Circuit* (IC) - é, indiscutivelmente, o Silício (Inoguchi 1974).

Uma característica comum a todos os dispositivos semicondutores é a possibilidade de controlar a resistividade e o tipo de transportador elétrico através da adequada adição de impurezas. Por exemplo, é possível variar a resistividade do Silício em seis ordens de grandeza, entre $10^{-3} \Omega \cdot cm$ e $10^3 \Omega \cdot cm$, variando a concentração do dopante (Rimini 1995).

Um circuito integrado é um dispositivo eletrónico que contém um elevado número de elementos funcionais, como transístores, resistências ou condensadores, num substrato semicondutor de Silício, selado num *package* com múltiplos terminais (Hitachi High-Tech n.d.).

A *wafer* é a unidade física atualmente utilizada no processo produtivo de dispositivos semicondutores. É fabricada através de um lingote cilíndrico de Silício, sendo depois cortada, segundo um plano perpendicular ao eixo do cilindro, em unidades com a forma de um disco, com uma espessura entre 0,5mm e 1mm (Hitachi High-Tech n.d.). Uma *wafer* é composta por um número elevado de *dies* – desde centenas até dezenas de milhares de *dies* por *wafer*. Uma *wafer* passa por vários processos, como exposição e *etching* dos padrões do circuito.

O *die* é a unidade mais reduzida do dispositivo semiconductor, contém o circuito eletrónico do mesmo e é singularizado – cortado e separado dos restantes *dies* da *wafer* - para depois ser montado no *package*. Ao conectar os pinos de contacto do semiconductor ao encapsulamento do circuito integrado, o *chip* está completo e passa a chamar-se *packaged IC* (Hitachi High-Tech n.d.). A passagem de uma *wafer* para um *die* e embalamento encontra-se exemplificada na Figura 5, assim como uma simples representação de um *die*.

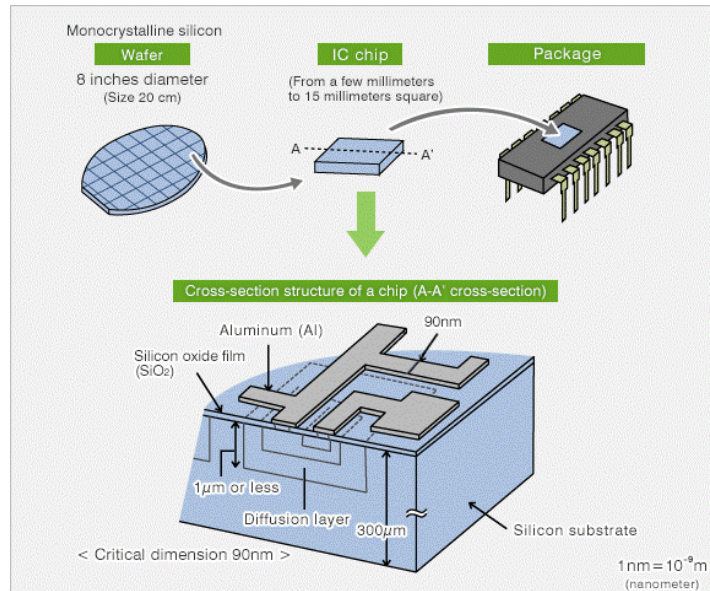


Figura 5 - Wafer, chip e package, imagem retirada de (Hitachi High-Tech n.d.)

A tecnologia usada para a embalagem de circuitos integrados é denominada de *Wafer Level Packaging*, e pode ser dividida de acordo com a necessidade de reconstrução da *wafer* em WLB – *Wafer Level Ball Grid Array* – para *fan-in* no processo normal e em eWLB – *embedded Wafer Level Ball Grid Array* – no caso de *wafers fan-out* que precisam de ser reconstruídas. A tecnologia de *Wafer Level Packaging* – embalagem ou empacotamento das *wafers* – normal, ou seja, *fan-in*, é utilizada especialmente para *chips* de pequena a média dimensão, com um número moderado de interligações, que é limitado pela necessidade de acomodar todas as interligações na matriz – em inglês, *die* -, num dado terminal (Meyer et al. 2008).

A impossibilidade de, em muitos casos, acomodar fisicamente todas estas interligações, levou ao desenvolvimento de uma tecnologia *fan-out* de WLB, por parte da Infineon⁴, com o nome de eWLB. Esta tecnologia toma por base uma *wafer* reconstruída de forma a aumentar a área de superfície que circunscreve cada *die*, permitindo assim um maior número de interconexões (Meyer et al. 2008).

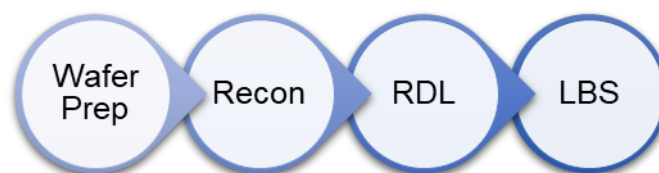


Figura 6 - Fluxograma do fluxo produtivo eWLB

O fluxo produtivo em eWLB, que é o processo em estudo, engloba as operações realizadas na empresa ATEP, está dividido em quatro áreas produtivas principais, *Wafer Prep*, *Recon*, *RDL* e *LBS*, como descrito no diagrama da Figura 6.

⁴ A Infineon Technologies AG é uma empresa que faz parte do top 10 mundial em soluções na área de semicondutores, empregando mais de 46000 trabalhadores (Infineon 2021).

O *step* de *Wafer Prep* é a primeira etapa deste fluxo produtivo e consiste na receção e preparação das *wafers* que chegam para serem trabalhadas nas etapas seguintes. Ao entrarem na área de *Wafer Prep* as *wafers* são recebidas na linha e depois são realizadas inspeções e verificações de cada lote que entra. Terminado este passo, é colocada uma película protetora na parte ativa das *wafers*, com o objetivo de protegê-las nas etapas seguintes. No passo seguinte, é realizado um desbaste da zona não ativa da *wafer*, para reduzir a sua espessura, sendo esta posteriormente colocada numa película montada num arco plástico, *frame*, para facilitar manipulação das *wafers* e conferir algum suporte às mesmas. O último passo desta etapa é a singularização das unidades, *chips*, da *wafer*, que ficam apenas suportadas pela película polimérica referida.

O próximo *step* é o de reconstrução da *wafer*, *Recon*. Os *dies* são colocados num suporte com uma película adesiva, com a face ativa virada para a película, o que mantém os *dies* corretamente posicionados e protege a face ativa durante as etapas seguintes. De seguida é formado um molde em torno dos *dies*, por um processo de moldagem por compressão (Meyer et al. 2008). Com a *wafer* reconstruída, remove-se a *frame* e a película, e são realizadas medições, ajustes e marcações.

De seguida é realizado o *step* de RDL, *Redistribution Layer*, onde é aplicada uma, ou várias, camada(s) de dielétrico, distribuída(s) uniformemente através da rotação da *wafer*, e realiza-se uma cura a baixa temperatura. Depois, realiza-se um conjunto de processos para a deposição da camada de redistribuição, passando do pequeno *chip* para uma placa maior e providenciando espaço para os elementos de interligação (Meyer et al. 2008).

O último *step* é o de *Laser, Ball Attach, Singulation* onde são realizadas as operações finais sobre as *wafers*, aplicação das bolas de solda, curas e singularização para embalagem.

3.2.1 RDL - Metrologia

Na área de RDL, introduzida na secção anterior, a *wafer* passa por diferentes etapas de metrologia. Num dos *steps* é medido o deslocamento, ou seja, desvio, de cada *die* relativamente à matriz teórica. Este desvio existe porque ao colocar o *mold carrier* existe sempre um arrastamento dos *dies*. Outros *steps* de metrologia dentro do RDL são os relacionados com o controlo do *warp* – defeito relativo à planeza da *wafer* que surge devido a tratamentos térmicos agressivos – de um determinado número de *wafers* por lote, por um processo de amostragem. Neste *step* é realizado um varrimento por laser da *wafer* para medir e representar tridimensionalmente a superfície. A superfície apresenta muitas vezes uma curvatura hiperbólica, positiva ou negativa, em relação ao plano principal da *wafer*. Existem também *steps* de controlo de delaminações no material fotossensível.

Nos *steps* de *Dry* relacionados com metrologia, é realizada a medição da espessura do material fotossensível da camada de dielétrico em equipamentos da família dos perfilómetros. Também é medido o desalinhamento entre o *die* de silício e a primeira camada dielétrica, medição efetuada nos equipamentos de *auto-measure*, também chamado de *surface-measure*. São ainda realizados *steps* para controlar as aberturas nas vias de alumínio do *die* e para controlar a quantidade de partículas e contaminações.

Nos *steps* de *Wet* são realizadas inspeções para verificar as características visuais do processo de *Plating*, nomeadamente, danos na estrutura do cobre, ausência de cobre, resíduos de *Seed Layer* e pontes de cobre.

Um outro *step* na área de RDL é a medição da espessura do cobre para controlar este valor nas vias de cobre, que é realizada em equipamentos do tipo perfilómetros. Estes, para além disto, medem espessura da camada de material fotossensível, em camadas superiores de dielétrico. Também existem equipamentos como os *automated optical inspectors* que verificam o

alinhamento em *steps* de Litografia. Estes realizam uma inspeção final a todas as unidades, com o objetivo de encontrar possíveis defeitos em todas as estruturas e em toda a superfície da *wafer*.

3.3 Equipamentos em estudo

Na empresa onde decorreu o presente projeto de dissertação os equipamentos estão agrupados por conjuntos de equipamentos semelhantes – mesmo fornecedor e modelo – ou por tipo de operações realizadas. Os conjuntos de equipamentos serão doravante referenciados como “família X”, em que cada família em análise terá uma letra diferente. Não sendo viável estudar todos os equipamentos logo desde início, foi tomada a decisão de começar por uma família, a família A, por ser um conjunto de equipamentos críticos, devido a constituírem muitas vezes um estrangulamento produtivo, e por uma *wafer* passar várias vezes nestas máquinas em diferentes fases do seu processo produtivo.

Na indústria de semicondutores o estrangulamento produtivo nunca está associado a apenas um processo ou equipamento, dada a complexidade do processo produtivo – *flow* com mais de uma centena de *steps*, com um percurso muitas vezes em *loop* – e ao elevado rigor necessário – operações de precisão a uma escala extremamente reduzida e entrega de produtos com o objetivo de zero defeitos. Desta forma, existem outras famílias que também realizam processos gargalo. Então, tem interesse tornar a ferramenta mais universal para permite uma análise transversal aos diferentes conjuntos de equipamentos. Assim, foram selecionadas mais três famílias para verificar a transversalidade da ferramenta.

3.3.1 Equipamentos A

A família A é composta por um conjunto de equipamentos de metrologia, um dos quais está situado na zona de RDL de luz amarela e os restantes na linha, na zona de Metrologia onde a luz é branca, como no resto da linha. Estes equipamentos só podem processar um lote de cada vez por só terem uma estação de carregamento de FOUPS – *loadport* – mas podem ter mais do que uma *wafer* a ser processada de cada vez. Realizam operações de medição e de inspeção e, por norma, atuam em modo remoto, transmitindo as transações automaticamente para o *Material Tracking* e as alterações de estado⁵ para o CERBERUS.

3.3.2 Equipamentos B

A família B é, também, constituída por conjunto alargado de equipamentos da área de metrologia. Dentro desta família, existem dois tipos de equipamentos, tipo I e tipo II. Cada tipo de equipamento dentro desta família corresponde a um fornecedor diferente e tem características operacionais diferentes. Estes equipamentos realizam operações de inspeção.

3.3.3 Equipamentos C

Ainda para equipamentos que realizam operações de metrologia, a família C é constituída por um conjunto de máquinas que avaliam o perfil das *wafers*, o que também é uma operação delicada e que demora um período de tempo considerável a ser realizada. O tempo de cadência estimado para estes equipamentos é, em média, bastante superior ao tempo associado às operações realizadas pelas famílias A e B. Em alguns equipamentos da família C, os dados

⁵ As alterações de estado são transmitidas na forma de uma tabela com indicação do estado anterior do equipamento – produtivo, engenharia, tempo em baixo, entre outros -, do estado que acabou de terminar, com a data em que começou e a sua duração, e o estado para o qual o equipamento vai transitar.

transmitidos pelos equipamentos não são exatamente iguais às transações disponibilizadas pelas restantes famílias.

3.3.4 Equipamentos D

Foi tomada a opção de incluir na análise uma família de equipamentos que não faz parte da área de metrologia. A família D é composta por equipamentos que transferem para a superfície da *wafer* o padrão do produto correspondente, que, por sua vez, permite delimitar o caminho de crescimento do cobre. Estes equipamentos podem ter até dois lotes a ser processados em simultâneo.

3.4 Metodologia seguida

Para monitorizar a *performance* dos equipamentos, em termos de disponibilidade, e os tempos de cadência dos diferentes produtos em cada *step*, existem diferentes bases de dados, a partir das quais é possível tratar os dados diretamente de ferramentas específicas ou por meio de folhas de EXCEL com um certo nível de automação.

Sumariando, o EDEX é um *business oriented program* que permite executar *queries* e realizar operações entre os dados que vai buscar a uma base de dados, o M2Go. O M2Go é uma base de dados produtiva com informação em tempo real da linha de produção. No M2Go, na ferramenta de *Material Tracking*, está disponível a informação relativa a transações associadas às operações realizadas em cada equipamento. Este *software* apenas é capaz de apresentar e exportar os dados. O CERBERUS é um *software* desenvolvido internamente na empresa para analisar o estado dos equipamentos ao longo do tempo, sendo utilizado em grande parte como uma ferramenta de suporte à decisão. Dos *softwares* e ferramentas mencionados, o M2Go e o CERBERUS são os mais utilizados dentro da Capacidade, pelo que apenas estes serão alvo de uma descrição mais detalhada, apresentada nas secções seguintes.

A análise da *performance*, a partir dos dados do *Material Tracking* dos equipamentos nas diversas etapas do processo produtivo é realizada regularmente. Este estudo é realizado semanalmente, ou a cada quinze dias, ou quando ocorre uma falha grave num equipamento e é necessário verificar a *performance* dos equipamentos que realizam as mesmas operações para averiguar se existe capacidade para manter os planos de produção. Com esta análise é possível determinar a utilização dos equipamentos de forma mais detalhada, comparando com a utilização do CERBERUS, sendo possível analisar o *Speed Loss* e o RTT dos produtos. No entanto, é uma análise demorada de se realizar ao ocupar, no mínimo, uma hora ao engenheiro responsável, uma vez que o processo não é totalmente automático. Os resultados obtidos obrigam sempre a alguma manipulação do EXCEL e não é possível variar o horizonte de análise de forma expedita, mas o ficheiro com os dados históricos para um período alargado consegue manter uma dimensão bastante reduzida em termos de espaço. A metodologia seguida nesta análise é aprofundada na Secção 3.4.4.

3.4.1 Software de Material Tracking (M2Go)

Uma das formas de extrair dados para posteriormente os trabalhar de forma a compreender o que é que cada equipamento está a fazer em cada momento é através do software de *Material Tracking*. O M2Go é uma ferramenta que disponibiliza, para um dado horizonte temporal e para um conjunto de equipamentos, as transições de estado em cada equipamento, de uma forma integrada em sistema. Esta informação é de extrema relevância e é com estes dados que a ferramenta desenvolvida é alimentada. A ferramenta de estudo da utilização e da *performance* dos equipamentos utilizada atualmente utiliza parte dos dados exportados do *Material Tracking* do M2Go. No entanto, saber apenas que uma dada *wafer*, de um certo lote, registou uma

transação - as diferentes transações de interesse encontram-se descritas na Tabela A-1 do Anexo A - num determinado equipamento, não dá de forma imediata informação sobre que tipo de operação é que o equipamento está realmente a realizar, nem sobre os principais índices de *performance* do mesmo. Torna-se então essencial tratar estes dados para passarem a informação, com valor prático.

Este *software* tem a vantagem de disponibilizar, entre outras coisas, dados sobre todas as transações – isto para os equipamentos que têm capacidade de recolher e enviar este tipo de informação para o sistema –, a *wafer* processada, o lote, o *step* realizado, o equipamento, a câmara do equipamento, o nome do produto, o tipo de operação e o momento – com precisão ao segundo – da transação. Para além das informações de *Material Tracking*, em tempo real e com os registos históricos armazenados, o M2Go tem muitas outras funcionalidades. Disponibiliza informações relativas a um lote, em termos de histórico de operações, atributos e comentários relevantes por parte dos operadores, o que é usado numa fase posterior, num estudo aprofundado de problemas específicos que ocorram.

3.4.2 *Software* de monitorização do estado dos equipamentos - CERBERUS

Com o *software* de monitorização dos equipamentos existentes é possível ter alguma informação sobre o estado dos equipamentos em cada momento e de forma expedita. O estado de cada equipamento pode ser atribuído de forma automática ou pode ser indicado por um operador da linha, dependendo do equipamento e do modo de funcionamento selecionado. Existem equipamentos diretamente ligados ao CERBERUS e que alteram o estado automaticamente, e outros equipamentos em que a comutação de estado tem de ser realizada manualmente. Esta dualidade de funcionamento significa que a atribuição nem sempre é realizada segundo o mesmo critério e que o estado atribuído pode não corresponder em todos os momentos ao estado real do equipamento. Por exemplo, se um operador deixar a máquina em modo produtivo e esta parar por algum motivo e o estado não for alterado por a máquina não ter nenhum operador naquele momento, isto afeta a correta duração do estado, podendo ser atribuído o estado errado, o que significa uma definição incorreta.

Através deste tipo de *software* é possível saber se a máquina está a funcionar em modo produtivo – PR, *productive* –, se está em espera – SB, *stand by* –, em paragem, programada – SD, *scheduled downtime* –, não programada – UD, *unscheduled downtime* –, ou a ser utilizada para atividades de engenharia – EN, *engineering*. No entanto, saber se a máquina está em funcionamento, ou não, é insuficiente para ter um controlo eficaz dos equipamentos, pelo que é necessário ter um maior grau de detalhe e analisar de forma mais pormenorizada o tempo em que a máquina está em funcionamento. Um estudo mais aprofundado é necessário para definir a disponibilidade real dos equipamentos e fazer um planeamento mais correto e mais robusto da capacidade produtiva.

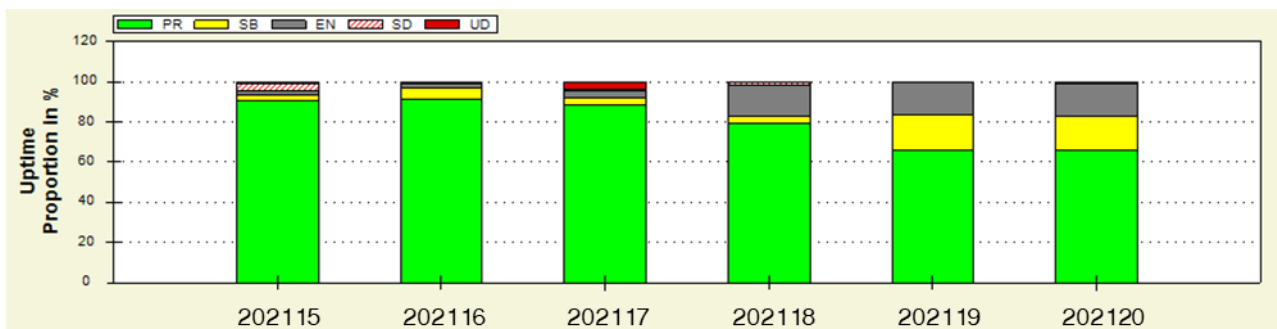


Figura 7 - Utilização de equipamentos A, entre w202115 e w202120, extraído do primeiro módulo do CERBERUS

Neste *software* estão disponíveis dois módulos. O primeiro módulo permite ver a utilização dos equipamentos, em percentagem da unidade de medida escolhida – dia, semana, mês, trimestre, ano ou equipamento -, para um dado período de tempo. A Figura 7 apresenta um exemplo deste módulo, para equipamentos da família A, entre as semanas w202115 e w202120.

O outro módulo disponibiliza em formato visual a evolução cronológica do estado dos equipamentos selecionados, durante o horizonte de análise pretendido. Como está representado na Figura 8, permite um estudo das alterações do estado dos equipamentos ao longo do tempo. Tem ainda a funcionalidade de permitir ver de forma expedita o tempo em que esteve em cada estado, quando começou e terminou, e uma breve descrição da causa que levou ao estado, quando este é diferente de PR. Finalmente, neste módulo é possível extrair, em formato de tabela, as alterações de estado, com informação do momento em que ocorreram, do estado prévio, do estado atual, do estado para que vai transitar – isto é possível porque estas informações são obtidos no fim de cada estado – e a duração do estado.

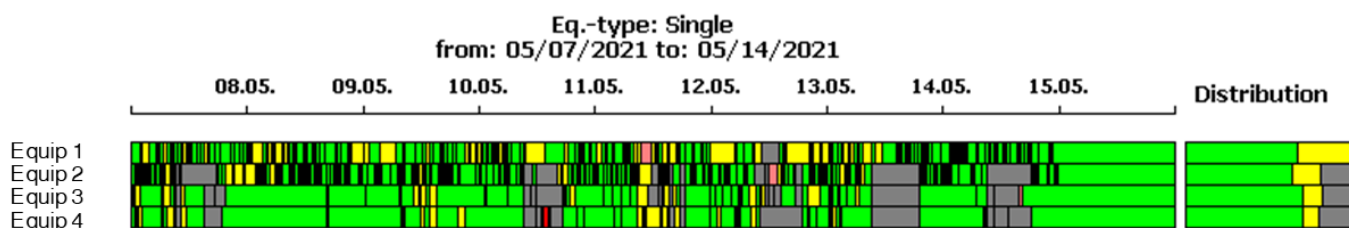


Figura 8 - Estado de equipamentos da família A, na semana w202120, extraído do segundo módulo do CERBERUS

3.4.3 Metodologia de cálculo do RTT através do EDEX

O EDEX permite executar *queries* para calcular de forma automática o *Raw Process Time* (RPT), indo buscar os dados ao *Material Tracking* do M2Go. Nos dados do EDEX está disponível o primeiro registo de *start* e o último registo de *complete*, para uma dada *wafer* num dado *step*, no período em análise. Os dados são ordenados cronologicamente, do mais antigo para o mais recente, de acordo com a última transação de *complete*.

O tempo de cadência de uma unidade produtiva, RTT, é depois calculado – através de um pequeno programa em EXCEL - pela diferença entre o início do processamento de uma *wafer* e o fim dessa mesma operação, caso o equipamento não esteja a processar mais nenhuma unidade quando esta começa. Neste caso o RTT toma o mesmo valor do RPT - o tempo entre o *start* e o *complete* de uma *wafer*. Se, no momento em que a *wafer* começar, estiver outra no equipamento, o tempo de cadência corresponde à diferença entre o fim da *wafer* anterior e o fim do processamento da *wafer* atual. Esta forma simplificada de calcular o tempo de cadência permite obter resultados de forma célere. No entanto, os resultados de tempo de cadência podem vir enviesados por excesso porque, ao usar o primeiro registo de início e o último registo de término de processamento de uma *wafer* num *step*, não são contabilizados reproprocessamentos de *wafers*, nem *wafers* cujo funcionamento foi abortado. Ainda, se o equipamento começar a processar uma *wafer*, parar e depois voltar a processar a mesma *wafer*, todo este tempo é contabilizado como tempo de cadência. Então, uma parte dos valores de RTT obtidos, para os casos supramencionados, não corresponde ao valor correto do tempo de cadência produtivo.

3.4.4 Metodologia de cálculo da utilização dos equipamentos

Com os dados extraídos da forma descrita no início da presente Secção 3.4, a utilização de cada equipamento era calculada segundo uma metodologia com intervenção manual, apesar de já ter automatização para os cálculos e para gerar alguns gráficos. Uma vez que ainda não tinha ocorrido um estudo com a profundidade do realizado no âmbito da presente dissertação, a

ferramenta existente tinha algumas oportunidades de melhoria e funcionalidades a implementar. No entanto, era uma ferramenta capaz de apresentar alguns resultados, o que permitia ter uma base para analisar o problema da capacidade e da utilização dos equipamentos.

A metodologia mencionada no parágrafo anterior pode ser descrita nos seguintes passos. Para iniciar a determinação da utilização dos equipamentos, exportavam-se do EDEX os dados relativos aos equipamentos em estudo e período em análise. O RTT era calculado de acordo com a metodologia descrita na Secção 3.4.3. De seguida, era encontrada uma chave referente ao produto que permite identificar os *targets* – alvos de produção – do produto, quer em termos de RTT, quer em termos de amostragem. A correspondência e verificação desta chave com as chaves no ficheiro com os *targets* é uma operação manual e que tinha de ser atualizada semanalmente, uma vez que os *targets* variam não só de produto para produto, mas também de semana para semana. Esta é uma das tarefas mais trabalhosas e que mais tempo útil consome ao responsável por manter e atualizar o ficheiro com o cálculo da utilização dos equipamentos.

Posteriormente, eram contabilizadas as *wafers* processadas em cada *step* e este valor era comparado com o alvo de amostragem para identificar o número de *wafers* acima do alvo. Ao tempo de processamento de *wafers* em excesso de amostragem era atribuído o estado de *Oversampling*.

O *Speed Loss* era calculado como a diferença entre o tempo de cadência produtivo calculado e o tempo de cadência de *target*. Esta diferença pode ser positiva, se o tempo de cadência for superior ao alvo, ou negativa, se for inferior ao alvo. Para a contabilização do *Speed Loss* na utilização, todos os tempos associados a este estado eram somados, fossem eles positivos ou negativos. Isto implica que o número de horas semanais a que corresponde a utilização semanal de um equipamento pode não corresponder às 168 h (7 dias/semana x 24 h = 168 h/semana).

O tempo em que a máquina não estava a processar nenhuma *wafer* era contabilizado como TBW – *Time Between Wafers*. Os restantes estados podem ser classificados como *Rework*, para *wafers* que fazem *steps* identificados como *steps* de retrabalho, *Productive* para *wafers* produtivas ou *Productive 100%* para *wafers* produtivas em que todo o lote é processado – nos *steps* de metrologia muitas vezes é realizada amostragem, processando apenas parte do lote. Finalmente, para *wafers* que não têm tipo definido, era atribuído o estado de *Unplanned*.

Desta forma, era possível obter um relatório da utilização dos equipamentos, calculado de forma simples e num ficheiro que não ocupava demasiado espaço, o que se justifica, em boa parte, pela opção de só ter uma linha para cada *wafer* em cada *step*, guardando apenas o primeiro *start* e o último *complete*. Esta simplificação tem um grande impacto sobre o funcionamento da ferramenta. Permite reduzir o espaço ocupado, reduzindo o número de linhas com informação. Simplifica bastante os cálculos a efetuar, por não obrigar a percorrer toda a tabela de cada vez que se calcula o RTT, o RPT ou o TBW. Assim, o tempo de processamento dos programas no ficheiro EXCEL é reduzido. O relatório obtido inclui, para além da utilização dos equipamentos, um conjunto de análises dos estados definidos. Outra limitação é a necessidade de criar manualmente tabelas e gráficos se se pretender aumentar o período de análise, uma vez que estes foram criados manualmente para um certo número de semanas.

Todo o processo de atualização do ficheiro, com a ferramenta para o cálculo da utilização era realizado semanalmente e, por exemplo, para os equipamentos da família A demorava entre quarenta e cinco minutos a uma hora. Durante este tempo, quem estivesse a trabalhar nesta tarefa teria de dedicar inteiramente a sua atenção ao processo, dado o elevado número de operações e verificações manuais que esta metodologia exige.

4 Desenvolvimento da ferramenta e definição de planos de ação

Neste capítulo, é abordado o desenvolvimento da ferramenta de monitorização do estado produtivo de equipamentos. Seguindo uma sequência lógica, inicia-se com uma revisão do estado atual, analisando o método utilizado e os resultados obtidos, partindo para os requisitos da ferramenta e posteriormente descreve-se a ferramenta *per si*.

No final do projeto, foi elaborado um manual de utilização da ferramenta, com uma especificação detalhada do seu funcionamento, para auxiliar os colaboradores da ATEP que vão usar a ferramenta. Este está disponível no Anexo H, disponibilizado num volume separado.

4.1 Pontos a realçar no estado atual e objetivos para a ferramenta

Do Capítulo 3, importa salientar várias oportunidades de melhoria para ter um maior domínio sobre o processo produtivo e também melhorar o planeamento de produção:

- É bastante interessante passar a analisar todas as transações associadas ao processamento de cada *wafer*, e não só o primeiro *start* e o último *complete*;
- A definição do método de cálculo da cadência produtivo deve ser revista, para se aproximar à realidade;
- É necessário analisar os diferentes tipos de casos e situações extraordinárias que podem ocorrer no processamento das *wafers*, tanto em modo produtivo como em fases de engenharia ou de lançamento de produto;
- É interessante tornar mais autónomo e célere todo o processo, tanto na fase inicial de tratamento dos dados, como nas análises que advêm;
- A introdução de alguns índices e análise individualizada de alguns fatores de capacidade são aspetos relevantes a adicionar;
- A identificação do processamento, em determinados *steps*, de um número de *wafers* superior ao definido como alvo de amostragem é uma medida interessante a apresentar;
- Há interesse em integrar a informação recolhida do *software* de monitorização dos equipamentos, de forma a cruzar informação para refinar a granularidade da análise a realizar.

Estas oportunidades de melhoria coincidem com os objetivos da ferramenta a desenvolver, para além dos mais básicos – e estruturais – que já eram, em certa medida, alcançados anteriormente. Estes são o cálculo do *Speed Loss*, por comparação do RTT *target* com o medido, a definição congruente dos diferentes parâmetros, a capacidade de analisar um conjunto de máquinas em simultâneo e num horizonte temporal mais ou menos alargado, entre outros.

4.2 Desenvolvimento da ferramenta

Todo o desenvolvimento da ferramenta, em termos de programação, de análises a efetuar, de cálculo dos tempos de cadência e definição de estados, forma de apresentação de dados e

utilização global da ferramenta foram idealizados, estudados e implementados de raiz. O processo de desenvolvimento da ferramenta decorreu ao longo de vários meses, com algumas iterações significativas e muitas pequenas adaptações, mantendo um contacto permanente com o Departamento de Planeamento, uma vez que a ferramenta foi desenvolvida no seio deste. De salientar que o apoio dentro do Departamento foi essencial em todos os aspetos e momentos do desenvolvimento da ferramenta.

Conhecendo a informação disponível e tendo estabelecidos os objetivos de informação a disponibilizar, é possível definir os estados operacionais a ser atribuídos a cada equipamento, em cada momento, para depois proceder à correta determinação destes estados.

4.2.1 Definição dos estados operacionais da ferramenta

Os diferentes estados que podem ser atribuídos a um equipamento foram definidos de acordo com a informação que era possível inferir do tratamento do registo de transações, recolhido de cada equipamento, e com o tipo de produto em processamento. A estes estados foram acrescentados os estados atribuídos ao equipamento no CERBERUS.

O nome a atribuir a cada estado partiu inicialmente de duas fontes: da nomenclatura comumente utilizada na literatura, como é o caso de *Time Between Lots*, *Time Between Wafers*, *Speed Loss*, entre outros, e dos nomes já utilizados internamente na empresa. A denominação dos restantes estados foi definida dentro da equipa de Capacidade do Departamento de Planeamento, promovendo nomes simples, inequívocos e em inglês – língua oficial da empresa mãe, Amkor, e utilizada para os projetos desenvolvidos na empresa. Os nomes selecionados foram, numa fase final, discutidos com membros de departamentos relacionados com o assunto, nomeadamente, Produção e Processo.

O processo de atribuição do estado na ferramenta inclui vários passos, nos quais são efetuadas sobreposições e agrupamentos de acordo com o nível de informação a apresentar. As sobreposições são realizadas em dois momentos distintos: primeiro quando uma *wafer*, num dado período, tem como estado atribuído produtivo (sobre este pode-se sobrepor o estado de *Productive 100%* e ainda o de *Oversampling*, como é explicado mais à frente nesta secção); depois, quando se cruza com a informação de outros sistemas. Este processo de atribuição de estado pode ser repartido em três níveis. Os estados finais apresentados pela ferramenta encontram-se resumidos no quadro da Tabela A-2, no Anexo A.

No Nível I são apenas analisados os dados das transações obtidas a partir do *Material Tracking*. Com estes dados, define-se os seguintes estados, de acordo com as condições estipuladas:

- *Productive* (Produtivo): corresponde ao tempo entre uma transação de *start* de uma *wafer* e de *complete* da mesma *wafer*, ou entre o *complete* de uma *wafer* e o *complete* da *wafer* seguinte, caso o *start* desta última ocorra antes da primeira ter completado o processamento. Esta é a forma de cálculo do RTT para wafers que vai ser utilizada. Um equipamento pode ter simultaneamente mais do que uma *wafer* no seu interior;
- *Time Between Lots* (Tempo entre Lotes): tempo entre a conclusão de um lote (*complete* da última *wafer*) e o início do lote seguinte (*start* da primeira), no mesmo equipamento;
- *Time Between Wafers* (Tempo entre Wafers): tempo entre a conclusão do processamento de uma *wafer* e o início da *wafer* seguinte, quando o equipamento está a processar uma *wafer* de cada vez;
- *Failed Processing* (Falha de Processamento): tempo em que o funcionamento do equipamento é diferente do normal. Por exemplo, tempo entre um *start* de uma *wafer* sem esta ter *complete*, ou de *complete* sem ter tido antes um *start*, e a transação seguinte. Pode-se dever ao incorreto funcionamento do equipamento, à intervenção em modo local do operador, que não aparece dos dados do *Material Tracking* ou a outros fatores;

- *Wafer Reprocessing* (Reprocessamento de *Wafers*): tempo de processamento de *wafers* que repetem o mesmo *step*, ou seja, que têm mais do que um conjunto de *starts* e *completes*. A determinação do intervalo de tempo é realizada da mesma forma que no estado produtivo. Para uma *wafer* nestas condições, durante as primeiras vezes que esta realiza o *step* em causa, o tempo de processamento é atribuído ao estado de *Wafer Reprocessing*. Na última vez que a *wafer* realiza o *step* o estado é produtivo. Esta decisão prende-se com o facto de se considerar que a última vez que o *step* foi realizado corresponde à vez que em que a máquina processa a *wafer* corretamente. Então, apenas o último processamento é considerado como realmente produtivo;
- *Rework* (Retrabalho): tempo em que o equipamento está a funcionar normalmente e que seria definido como *Productive*, mas está a realizar *steps* definidos como operações de retrabalho. Estes *steps* são realizados devido a falhas em passos mais à frente do processo produtivo, o que obriga a refazer parte do fluxo produtivo dessa *wafer*;
- *Engineering* (Engenharia): tempo de processamento normal de *wafers* que seria atribuído ao estado *Productive*, mas que corresponde a operações realizadas em *wafers* do tipo de engenharia.

Um exemplo ilustrativo da atribuição do estado na ferramenta, no Nível I, em função do funcionamento do equipamento e das *wafers* que são processadas, é apresentada na Figura 9.

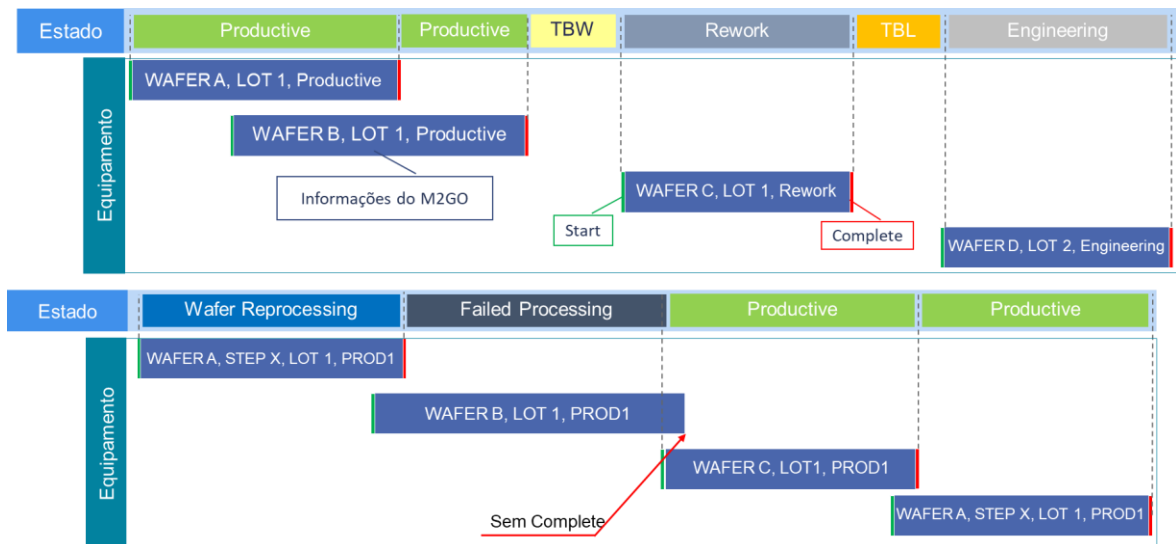


Figura 9 - Exemplo do funcionamento de um equipamento e corresponde estado atribuído - Nível I

No Nível II, parte-se dos estados definidos no Nível I e cruza-se com a informação disponível dos alvos de amostragem, alvos de RTT e dados dos produtos. Os estados definidos neste nível intermédio são os abaixo apresentados e exemplificados na Figura 10:

- *Speed Loss* (Tempo excessivo de processamento): parte do tempo produtivo que está acima do tempo de processamento alvo, para um dado produto, num determinado *step*, na semana correspondente. Corresponde à diferença entre o tempo de processamento medido e o tempo alvo, quando esta diferença é positiva. O tempo de processamento até ao alvo – ou seja, quando é menor ou igual ao RTT *target* – é atribuído ao estado *Productive*. A parte do tempo acima do alvo, passa a estar associado ao *Speed Loss*;
- *Oversampling* (Excesso de amostragem): tempo que foi definido no primeiro nível como *Productive* e que corresponde ao processamento de um número de *wafers* acima do objetivo de amostragem. Por exemplo, para um *step*, se o alvo de amostragem é três *wafers* de um lote de doze e na realidade são encontradas transações de *start* e *complete* referentes a quatro ou mais *wafers*, o processamento das três primeiras mantém-se como *Productive*, e o das restantes passa a estar associado ao estado de *Oversampling*;

- **Productive 100%** (Produtivo 100%): tempo de processamento de *wafers* de um lote que é processado na sua totalidade. Quando todas as *wafers* de um lote são processadas num *step*, o estado do tempo correspondente ao seu processamento passa de *Productive* para *Productive 100%*. Trata-se apenas da atribuição de um nome diferente, mas similar, para ter uma ideia mais direta da proporção de lotes com amostragem na sua totalidade.

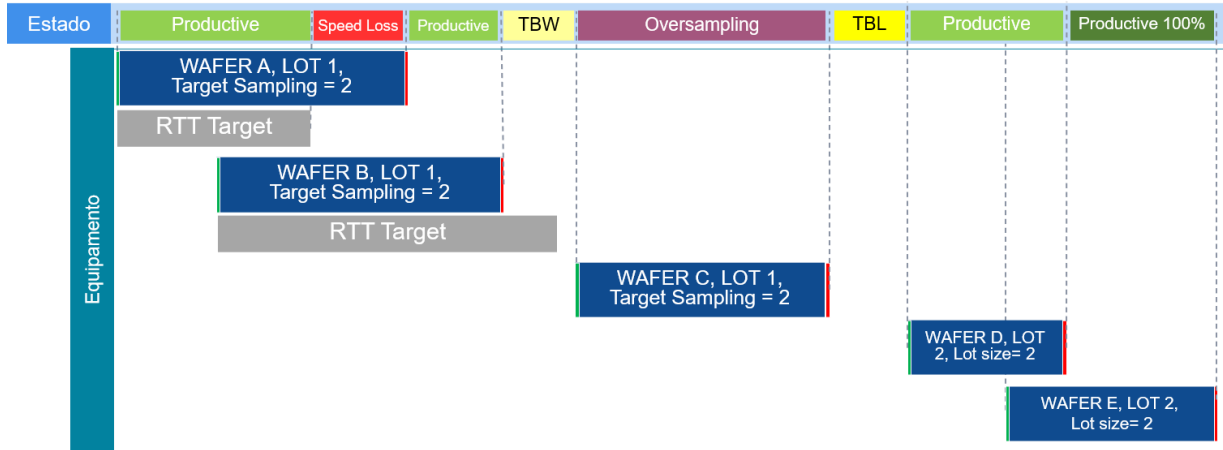


Figura 10 - Exemplo do funcionamento de um equipamento e corresponde estado atribuído - Nível II

Finalmente, no Nível III a informação extraída do Nível II é cruzada com os dados do *software* de monitorização dos equipamentos. Caso o estado no Nível II seja TBL, ou corresponda a um período de tempo em que os dados do *Material Tracking* indiquem que a máquina não teve um comportamento normal – isto é, o estado seja *Failed Processing* -, a ferramenta procura o estado definido no CERBERUS correspondente ao TBL, ou o *Failed Processing*, e altera o estado da ferramenta para um estado que encontre no CERBERUS. A duração deste novo estado será a duração do estado do CERBERUS, truncado até ao tempo do estado inicial que vem do Nível II. Reformulando, o tempo atribuído ao novo estado apenas se pode sobrepor ao TBL ou ao *Failed Processing*, e não pode ter uma duração superior à do TBL ou *Failed Processing* original. Esta atribuição final é exemplificada na Figura 11. Os estados do Nível III são:

- **UD** (Paragem não programada): tempo definido no CERBERUS como período em que ocorreram paragens não programadas;
- **SD** (Paragem programada): tempo definido no CERBERUS como período em que ocorreram paragens programadas, normalmente associadas a manutenção;
- **SB** (Tempo de espera): tempo definido no CERBERUS como período em que o equipamento esteve parado em espera. Esta espera pode ter várias causas, como falta de lotes para processar, falta de operador, falta de ordens de processamento, entre outras;
- **Engineering** (Engenharia): tempo definido no CERBERUS como *EN*, isto é, período dedicado a atividades de engenharia. Este estado fica com a mesma denominação atribuída ao processamento de produtos de engenharia no Nível I.

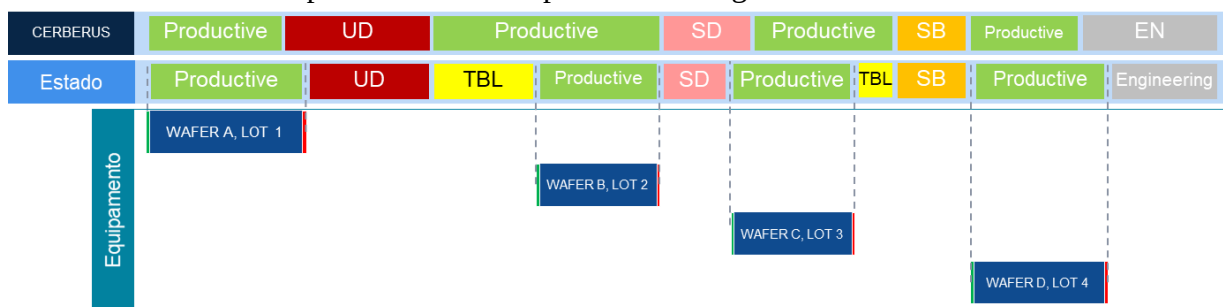


Figura 11 - Exemplo do funcionamento de um equipamento e corresponde estado atribuído - Nível III

A Figura A-1 do Anexo A apresenta os estados nos três níveis e correspondentes sobreposições.

4.2.2 Determinação dos estados operacionais da ferramenta

A determinação dos estados operacionais da ferramenta é realizada por meio de um ficheiro EXCEL criado como *template* e de programas desenvolvidos no ambiente de Visual Basic Applications, integrados nesse mesmo ficheiro.

O primeiro passo consiste no tratamento inicial dos dados extraídos diretamente do *software* de *Material Tracking* com as transações fornecidas pelos equipamentos. Estes dados serão doravante denominados de “dados originais”. Os dados originais são manipulados de forma a ter em consideração os produtos processados em modo local – apenas existem transações de *data upload* e *process setup*. Os dados originais, tratados, são copiados para uma nova folha e para cada entrada é determinado quando termina o processamento da *wafer* em questão. Normalmente, corresponde ao *complete* da mesma, mas quando uma *wafer* faz *start* sem depois fazer *complete*, considera-se a transação imediatamente a seguir. Esta determinação não é direta porque existem vários casos anormais em que uma *wafer* é processada várias vezes – não sendo fora do comum encontrar mais de meia dúzia de conjuntos de *start* e *complete* -, ou porque podem ocorrer diversas transações da mesma natureza seguidas, como por exemplo ter três ou quatro *starts* seguidos.

De seguida, os dados são agrupados por equipamentos e ordenados de acordo com o fim do processamento da *wafer*, no respetivo *step*, do mais antigo para o mais recente. As transações de *start* e de *complete* para uma *wafer* num determinado *step* não têm de estar, e na realidade não estão, seguidas ao analisar os dados cronologicamente, o que obriga a encontrar o par de transações que são correspondentes. Por exemplo, para a *wafer A*, no *step 1*, para a terceira transação de *start* é necessário encontrar o terceiro *complete*.

Com esta ordenação é possível realizar as operações para determinar os estados definidos no Nível I, apresentados na secção anterior.

O tempo de cadência, associado ao estado *Productive*, é o mais complexo de calcular, dada a não uniformização do funcionamento real do equipamento. Quando este funcionamento é o normal, em que uma *wafer* tem um *start* e de seguida o respetivo *complete*, podendo o equipamento ter mais do que uma *wafer*, mas processando-as em série, a determinação do tempo de cadência é direta e segue a definição de RTT para *wafers* mencionada na Secção 4.2.1. No entanto, o facto de uma *wafer*, num *step*, poder ter um número variável de transações associadas, em vez das duas, *start* e *complete*, dificulta o cálculo da cadência produtiva. Para lidar com esta situação, é necessário utilizar fórmulas mais complexas e colunas auxiliares, o que aumenta o tempo de processamento e espaço de armazenamento do ficheiro. Um dos passos para contornar este problema consiste em identificar o número de *starts* e *completes* para uma dada *wafer* num certo *step* e só calcular o tempo de cadência quando ocorre um *complete* e existe um *start* correspondente.

Se os dados das transações estivessem ordenados por data (cronologicamente, do mais antigo para o mais recente), o cálculo do TBL e do TBW seria obtido diretamente da diferença entre o fim de um lote, ou de uma *wafer*, e o começo do seguinte, em linhas consecutivas. No entanto, como a ordenação dos dados é por ordem cronológica do *complete* de cada *wafer*, para determinar o TBL é necessário procurar, para o mesmo equipamento, a entrada de data mais recente de *complete* no lote anterior e a mais antiga de *start* no novo lote.

A determinação do TBW é semelhante, sendo a procura entre *wafers* diferentes do mesmo lote e não entre lotes diferentes. Se o equipamento estiver a meio do processamento de uma *wafer* quando começa uma nova, o TBW entre estas duas *wafers* será nulo.

Sobre o estado de *Failed Processing*, a este estão associados tempos de processamento de *wafers* que não têm um par de *start* e *complete* correspondentes. Considerando que, por

exemplo, uma *wafer*, num *step* teve quatro registos de *start* e apenas um de *complete*. O tempo entre o último *start* – que, atribuindo um número por tipo de transação, corresponde ao número de *start* mais elevado, logo, três – que ocorreu antes do *complete*, e o próprio *complete* será *Productive*. O tempo entre o primeiro *start* e o *start* que teve *complete* – ou seja, o terceiro *start* – será tempo associado ao estado *Failed Processing*. Então a determinação do processamento incorreto de *wafers* e o respetivo tempo associado a estas operações, é determinado através da contabilização do número de transações de cada *wafer* em cada *step*, e, depois, da falha na correspondência entre os *starts* e *completes*.

Quando uma *wafer* é processada mais do que uma vez num dado *step*, o tempo desde o *start* correspondente – ou o *complete* da *wafer* anterior, o que ocorrer mais tarde – até ao último *complete* é determinado como *Productive*. Para todos os tempos produtivos de processamentos anteriores dessa mesma *wafer* no mesmo *step*, o estado atribuído é o de *Wafer Reprocessing*, e não de *Productive*. A determinação do último processamento assenta na contabilização do número de cada transação para cada *wafer*, em cada *step*.

Os restantes estados definidos no Nível I são variações do *Productive*, sendo que estes não levantam novos problemas na sua determinação além dos já mencionados.

Os dados do *Material Tracking* ao serem retirados para um dado conjunto de dias não têm obrigatoriamente a primeira transação às 00:00:00 do primeiro dia. O primeiro registo, então, não coincide forçosamente com o início do primeiro dia, pelo que é registado o tempo até à primeira transação, para cada equipamento. Este intervalo de tempo inicial é adicionado ao início do primeiro dia (00:00:00) do horizonte de análise. A esta data é de seguida adicionado o tempo determinado pela ferramenta no primeiro estado, e, depois, os tempos calculados vão sendo adicionados ao registo anterior de data acumulada. No final, esta soma acumulada – que corresponde à soma de todos tempos determinados, adicionados à primeira data – deverá corresponder exatamente à última transação registada. A exatidão desta correspondência prende-se com a resolução dos dados, que no caso em análise, se encontra nos segundos.

Se, por algum motivo, a soma de todos os tempos não coincidir com o último registo, a ferramenta não avança para os passos seguintes – determinação dos estados no Nível III. Os momentos que causam esta situação correspondem a casos esporádicos de funcionamento fora do normal, e são facilmente identificados e corrigidos. Desta forma é garantida uma maior fiabilidade nos dados extraídos da ferramenta, na medida em que não é contabilizado nem tempo a mais, nem tempo a menos, na definição da utilização dos equipamentos. Esta exatidão não era atingida em ferramentas similares, mais simples, que eram utilizadas anteriormente.

4.3 Cálculo do OEE

Em comparação com a disponibilidade de um equipamento, a *performance* global dos equipamentos foi estabelecida como um indicador de maior importância no cálculo da *performance* em qualquer indústria (Tayal et al. 2021). Este indicador pode ser estudado através do índice de Rendimento Operacional Global dos equipamentos – OEE.

Com definição do estado operacional de cada equipamento em todos os momentos do horizonte temporal em análise, é possível agrupar estes estados de acordo com os seis estados básicos da norma SEMI E10 e SEMI E79, definidas na Secção 2.2.5. Ao ter uma relação entre os estados definidos na ferramenta desenvolvida e os seis estados básicos, consegue-se correlacionar as perdas identificadas pela ferramenta com os seis grandes tipos de perdas de OEE – abordadas na Secção 2.2.2 – e assim definir cada um dos três termos para o cálculo do OEE. No diagrama da Figura 12 é demonstrada a relação entre os estados definidos na utilização da ferramenta e as componentes do OEE correspondentes.

A definição do OEE utilizada desvia-se, em certa medida, da sua formulação teórica original, para melhor servir o interesse prático deste índice na utilização real da ferramenta, como meio de auxílio para a monitorização dos equipamentos. Algumas das opções tomadas, nesta adaptação do caso teórico à realidade prática, vão de encontro a exemplos encontrados na literatura relativa à análise do OEE, em específico na indústria de semicondutores. Por exemplo, na norma SEMI E79, o tempo em que o equipamento está dedicado a operações de engenharia deveria afetar o índice de *Performance*, como verificado na Figura 3. No entanto optou-se por colocar o tempo associado a este estado a afetar a Disponibilidade, por ter interesse saber a disponibilidade de cada equipamento para realizar operações produtivas, e de forma idêntica à opção tomada por Foster et al. (2008).

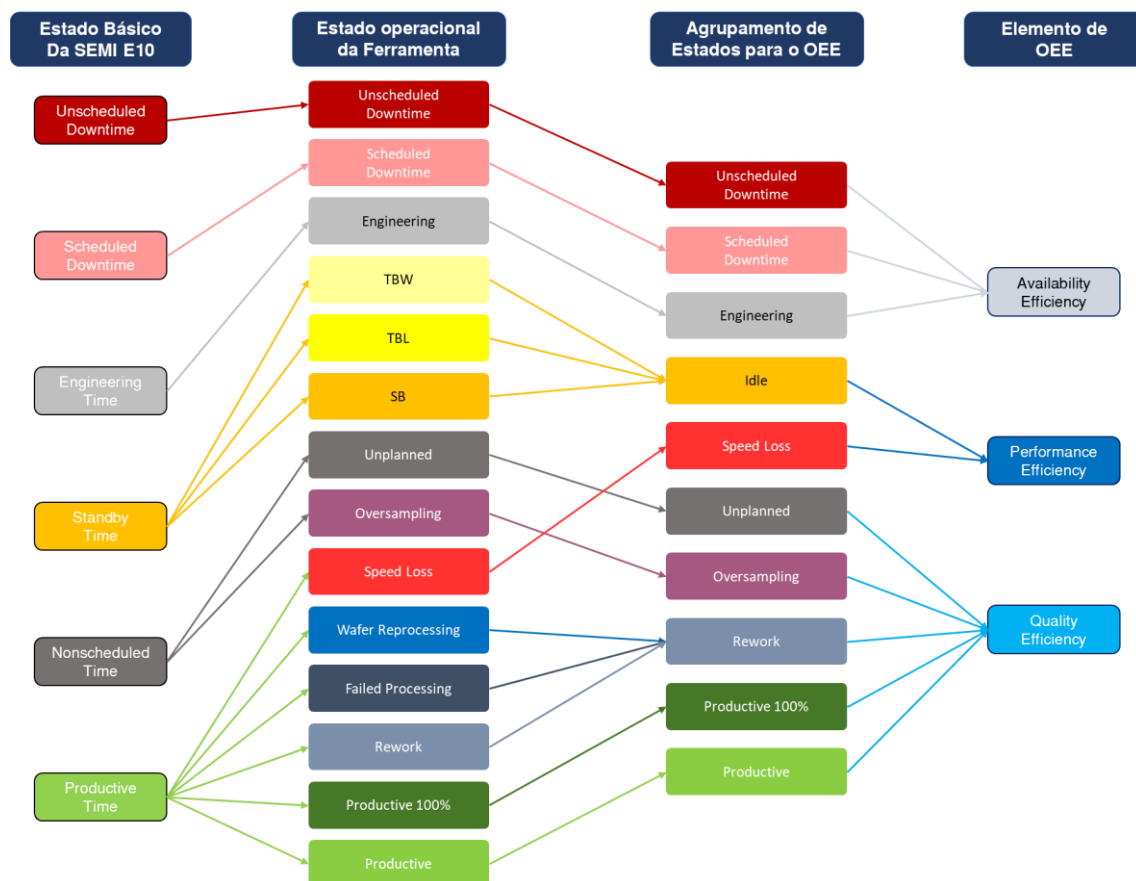


Figura 12 - Diagrama com as relações entre os Estados SEMI E10, Estados da Ferramenta e Elementos do OEE

Com a metodologia da determinação do OEE estabelecida e implementada, segue-se para a análise dos resultados obtidos. O OEE resulta da combinação de parâmetros individuais que levam em consideração perdas em diferentes fases do processo produtivo. Para que o OEE consiga ser melhorado, é necessário abordar de forma eficaz as perdas (Tayal et al. 2021).

Na Figura 13 é apresentado o OEE para os equipamentos da família A, para as primeiras vinte semanas do presente ano de 2021 – w202101 a w202120.

As diferentes componentes de perdas que afetam o OEE são apresentadas de uma forma desagregada e de acordo com o esquema de cores definido na Tabela A-2, do Anexo A. Esta opção de representação das perdas em formato cascata, como sugerido por Foster et al. (2008), favorece a comparação entre os diferentes termos em análise e facilita a interpretação de cada componente ao apresentá-los isoladamente, por oposição a um gráfico de barras empilhadas.

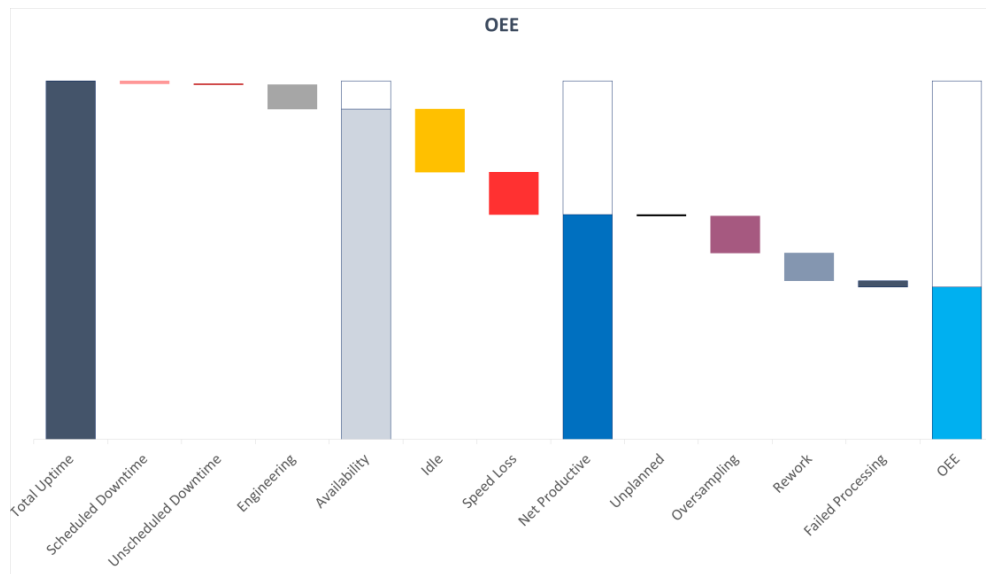


Figura 13 - OEE nos equipamentos da família A, w202101-w202120

4.4 Iterações mais relevantes na ferramenta

Com os principais objetivos da ferramenta alcançados, nomeadamente a correta definição do estado dos equipamentos a partir dos dados do *software Material Tracking*, foram discutidas funcionalidades a introduzir, tendo sempre em conta o seu interesse prático, mas também a capacidade de implementação em tempo útil e com os recursos disponíveis. As principais restrições estão associadas ao impacto que introduzido em termos de aumento do tempo necessário para tratar os dados, do tamanho ocupado pelo livro de EXCEL utilizado, e, mais importante, à não deterioração da informação previamente obtida.

4.4.1 Determinação do *Speed Loss*

A primeira grande alteração consistiu na repartição do tempo produtivo em *Speed Loss* para o tempo de processamento acima do alvo de cadência, e em produtivo para o restante. A informação é guardada numa forma tabelar, em que cada linha corresponde a uma entrada de uma transação e os tempos (de TBL, TBW, produtivos, entre outros) são determinados por diferenças entre datas de linhas diferentes. Então, no caso mais simples, o tempo produtivo de uma *wafer* é o tempo entre o *start* dessa *wafer* numa linha, e o *complete* desta, armazenado numa linha posterior. Deste modo, na linha com a transação de *complete* é atribuído, noutra coluna, o tempo em que o equipamento esteve produtivo e a processar essa *wafer* e, numa outra coluna, o estado do equipamento – *Productive*. Esta forma de organizar os dados facilita a posterior utilização de *Pivot Tables* para tratar os dados. Como cada linha só tem um estado, para repartir um tempo produtivo em *Productive* e *Speed Loss*, duplicou-se o número de linhas na tabela com todas as transações. Na metade superior, o tempo, no estado *Productive*, corresponde ao tempo entre *start* e *complete* truncado até ao RTT alvo. A diferença entre o RTT medido e o RTT *target*, quando era um valor positivo, passa a ser o tempo da linha gémea da primeira, na metade inferior, sendo que o estado nesta linha passa para o estado *Speed Loss*.

Esta duplicação das linhas implica um aumento considerável do espaço ocupado pelo ficheiro EXCEL. No entanto, esta operação só é realizada quando os cálculos mais exigentes e demorados já estão realizados e os resultados obtidos nessas células se encontram substituídos por valores, em vez de fórmulas, de forma a não prejudicar o tempo de processamento da ferramenta significativamente.

4.4.2 Cruzamento com os dados do CERBERUS

Dada a considerável dimensão, em termos de ocupação, do TBL, ponderou-se tentar encontrar uma melhor classificação para este estado. Desta forma, utilizando os dados de monitorização dos equipamentos retirados do CERBERUS, procurou-se atribuir um dos estados discriminados neste *software* a períodos identificados na ferramenta, como TBL ou *Failed Processing*. Estes foram os estados escolhidos uma vez que são tempos em que não se podem tirar grandes conclusões a partir dos dados de *Material Tracking* e porque muitas vezes correspondem a períodos de tempo consideráveis.

Para fazer esta sobreposição de informação, aproveitou-se a repartição da tabela com toda a informação da ferramenta mencionada na secção anterior. O estado no CERBERUS a atribuir é encontrado procurando o estado do equipamento no momento correspondente ao momento em que começa o TBL ou *Failed Processing*, adicionado de um terço da duração do TBL ou *Failed Processing*. A opção por encontrar o estado a um terço da duração depois de começar, e não no momento em que começa, prende-se no desfaseamento encontrado entre o estado real do equipamento e o estado que aparece no CERBERUS. Este desfaseamento pode-se dever ao facto de a atribuição no CERBERUS poder ser realizada manualmente e nem sempre ser automática. Outro motivo para procurar o estado algum tempo depois do TBL, ou *Failed Processing*, iniciar deve-se a, muitas vezes, existirem estados intermédios de duração muito curta – na ordem de dezenas de segundos - que não correspondem ao estado que tem interesse encontrar. O valor de um terço foi determinado de forma empírica, com um número reduzido de experiências, mas que nestas obteve melhores resultados que procurar o estado a meio da duração – acontecia, por vezes, perto do meio da duração encontrar estados intermédios e curtos. Esta opção é um ponto a estudar com mais atenção e profundidade em trabalhos futuros.

Depois da implementação da ferramenta e de esta estar a ser utilizada em casos práticos, foi revista a sobreposição dos dados com o CERBERUS. Foi sugerido que, nos casos em que a ferramenta encontra correspondência no CERBERUS, em vez de só considerar para o estado do CERBERUS a sua duração, se alterasse toda a duração do estado definido no nível anterior, TBL ou *Failed Processing*, para o estado encontrado no CERBERUS. Esta alteração tem algumas consequências e não é possível dizer diretamente que esta é uma opção com resultados mais próximos da realidade que o método utilizado anteriormente e definido na secção 4.2.1. O estudo comparativo destes dois métodos é outra proposta de trabalho futuro.

4.4.3 Generalização da utilização da ferramenta

A ferramenta foi inicialmente desenvolvida para um conjunto de equipamentos – família A – dos quais era possível extrair transações de *start* e *complete* de material, mas também transações de *process setup* e de *data upload*. Sobre estas duas últimas transações, normalmente todas as *wafers* de um lote realizam *process setup*, antes do lote começar a ser processado, e quando este processamento acaba é realizado o *data upload* referente apenas às *wafers* processadas. Quando um produto passa nos equipamentos da família A em funcionamento em modo local, não são geradas as transações de *start* e de *complete*. Estas transações de *start* e *complete* estão associadas, apenas, a produtos que são processados em modo remoto e, generalizando para outras famílias de equipamentos, em máquinas que funcionem de forma automática.

Para introduzir na análise os produtos processados em modo local e conseguir utilizar a ferramenta em máquinas semiautomáticas, adicionou-se um pré-tratamento dos dados exportados do *Material Tracking*. Para *wafers* que não têm transações de *start* e *complete*, num determinado *step*, as transações de *data upload* passam a ser consideradas como *complete* e as de *process setup*, apenas nas *wafers* do lote que fazem *data upload* no final, passam a *start*.

Esta funcionalidade permitiu, por um lado, entrar em conta com os produtos processados em modo local e, por outro lado, aplicar diretamente a utilização desta ferramenta a um conjunto mais alargado de equipamentos, incluindo os de funcionamento manual. No Anexo B está disponível um conjunto de imagens com os relatórios de visão geral da capacidade produtiva das famílias mencionadas na Secção 3.3. A Figura B-1 diz respeito à família B, a Figura B-2 à família C e, a Figura B-3 à família D.

Uma limitação desta funcionalidade prende-se com o desfasamento temporal entre a transação de *process setup* e de *start*, e entre *complete* e *data upload*. Existe um período de tempo variável entre as transações iniciais e outro período entre as finais. Este intervalo de tempo encontra-se, normalmente, na casa das unidades ou dezenas de segundos, até poucos minutos nos casos mais demorados. Isto implica que o tempo de processamento contabilizado, associado a estas *wafers*, será superior ao real, pelo que estas *wafers* teriam normalmente um *Speed Loss* demasiado elevado. Então, para mitigar este problema, optou-se por não caracterizar o *Speed Loss* nas *wafers* identificadas como processadas em modo local. Com esta opção, perde-se a informação do *Speed Loss* real destas *wafers*, uma vez que todo o tempo é considerado como *Productive*, mas aumenta-se a sensibilidade ao analisar a utilização e, em particular, o *Speed Loss* de um equipamento no geral de todos os seus produtos.

Uma proposta para trabalhos futuros é a de estudar as implicações de considerar o *process setup* como *start* e o *data upload* como *complete*.

4.5 Funcionamento da ferramenta

O funcionamento da ferramenta tem vindo a ser desenvolvido ao longo das secções anteriores, pelo que na presente secção é apresentado um fluxograma com o funcionamento resumido da mesma. Na Figura 14 é apresentado um modelo do funcionamento da ferramenta. O modelo encontra-se repartido em três níveis, como sugerido por A. Faria (2020b), começando no primeiro nível com as seis fases principais do funcionamento da ferramenta. As fases definidas são fechadas em si mesmas, sendo as quatro primeiras bastante diretas e autoexplicativas. A terceira fase corresponde à parte mais complexa do funcionamento da ferramenta, pelo que é aprofundada tanto em termos de *workflow* no segundo nível, como ao nível da especificação das instruções de trabalho relativas a tarefas específicas, no nível 3. A quarta e última fase é bastante simples, pelo que prescinde de uma explicação mais elaborada.

Nas duas primeiras fases são atualizadas as folhas com informações dos *targets* e dos produtos, recorrendo aos ficheiros com estes dados.

Na terceira fase é selecionado o ficheiro com extensão “.xlsx” com os dados do *Material Tracking*, sendo as operações de *data upload* e *process setup* corrigidas para *start* e *complete* em *wafers* que são processadas, mas não têm transações de *start* nem de *complete*.

Na quarta fase, os dados do CERBERUS relativos ao período e equipamentos em análise são importados para o ficheiro com a ferramenta, sendo estes dados adicionados a uma tabela com os registos do CERBERUS anteriormente importados.

A quinta fase encontra-se detalhada no fluxograma da Figura 14, onde são indicados os principais passos nos cálculos a efetuar pela ferramenta, sendo que a determinação dos estados operativos dos equipamentos – que corresponde à tarefa mais morosa – não volta a ser descrita com pormenor. Uma descrição completa foi realizada na Secção 4.2.2 do presente relatório.

Por fim, a sexta fase consiste em exportar os dados calculados para um ficheiro que contém os dados históricos do equipamento, previamente calculados – ou para um ficheiro de *template* novo, caso seja a primeira vez que um equipamento está a ser estudado.

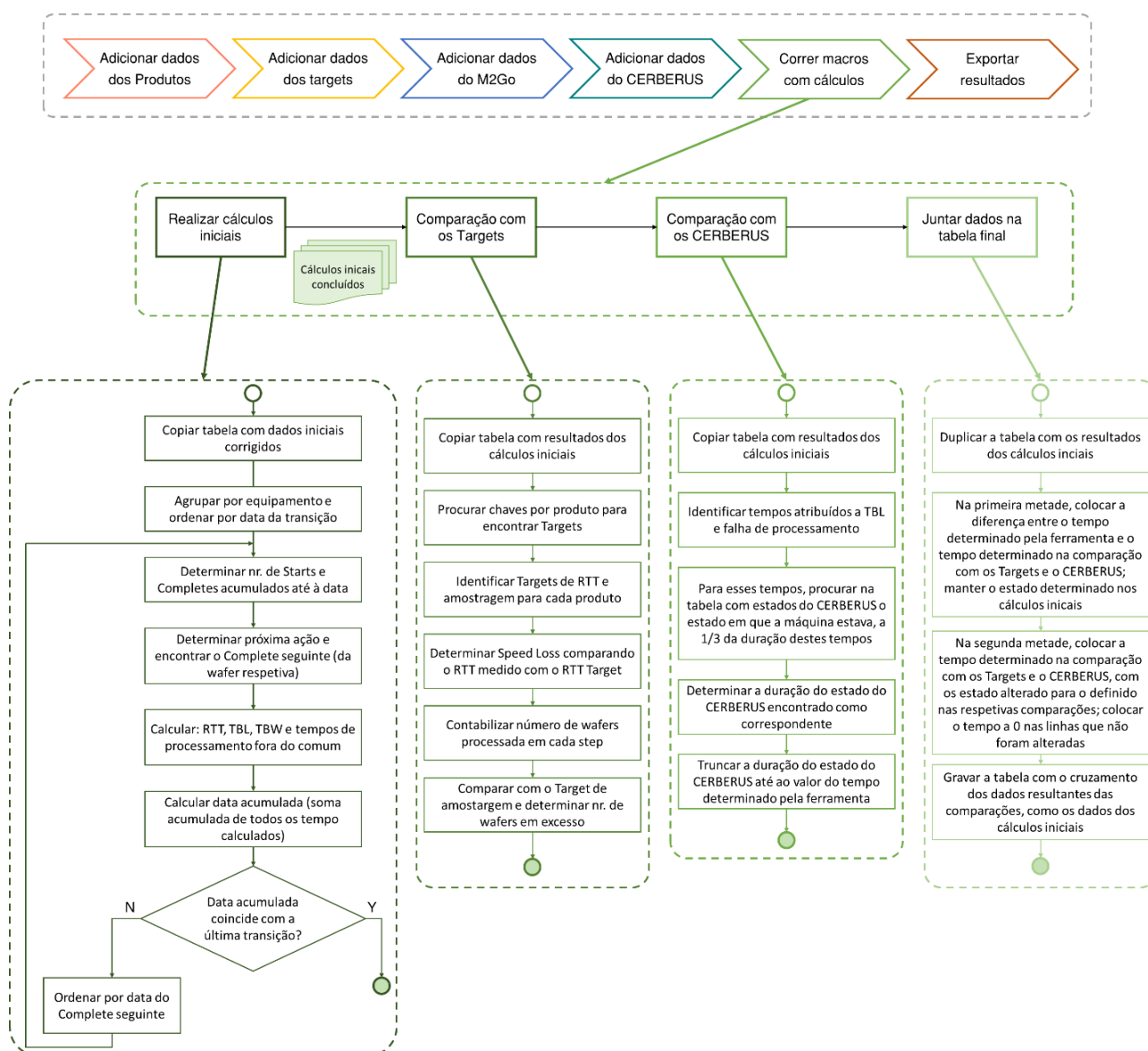


Figura 14 - Fluxograma com o funcionamento geral da ferramenta

4.6 Utilização da ferramenta

A ferramenta foi desenvolvida com o intuito de promover a sua utilização da forma mais direta e com a menor intervenção possível do utilizador. Com este objetivo traçado, foram desenvolvidas diversas iterações na ferramenta para reduzir o número de ações a realizar pelo utilizador. O utilizador, tendo os ficheiros auxiliares guardados, apenas tem, no limite, de clicar em dois botões para realizar todas as operações de forma a obter automaticamente os resultados.

Na Figura C-1 do Anexo C, está representado o fluxograma da utilização da ferramenta e na Figura C-2 é apresentado um diagrama com as diferentes bases de dados utilizadas. Acompanhando a Figura C-1, o passo de importar os dados do CERBERUS pode ser ultrapassado caso estes já se encontrem no ficheiro. Ainda analisando a Figura C-1, na verificação dos cálculos, o cálculo inicial pode não chegar ao valor correto. Isto pode acontecer caso seja inserido um número de transações demasiado elevado e que leve a que o computador não tenha capacidade de realizar todas as operações – não é incomum um computador normal dar erros de falta de memória disponível ao processar *array formulas* para poucas dezenas de milhares de linhas – ou caso o cálculo não tenha sido bem realizado. A segunda situação pode ocorrer em equipamentos que permitem ter dois lotes em simultâneo, ou quando há

ultrapassagens no processamento das *wafers*, em que por vezes o cálculo do TBL pode falhar por alguns minutos para situações fora do comum. Apesar de ser um erro fácil de corrigir com um *override* manual – basta ir à linha da tabela correspondente e calcular o TBL, fazendo a diferença entre os dois lotes em causa – esta é uma situação a estudar e proposta nos trabalhos futuros. Ultrapassado este passo, a utilização da ferramenta volta a ser bastante direta, selecionando um botão para refazer a folha com os valores dos *targets* e outro botão para continuar com o programa. No final é apresentada a Tabela A-3 do Anexo A com os dados necessários para serem exportados para um ficheiro de análise.

4.7 Apresentação dos resultados obtidos

Para permitir uma boa interpretação dos dados calculados, foi desenvolvido um ficheiro com diversas análises previamente preparadas, que são atualizadas simplesmente com a exportação dos dados no final do cálculo para este ficheiro com as análises. Os novos dados calculados são concatenados com os dados históricos anteriormente calculados, o que permite considerar um período de tempo alargado na análise de um conjunto de equipamentos. O número de análises, a complexidade de algumas destas e o elevado número de linhas ocupadas com os dados de um conjunto de equipamentos – para a família A, os dados das primeiras vinte semanas do ano ocupam mais de um quarto de milhão de linhas – levam a que o espaço ocupado pelo ficheiro de análise seja elevado. Como o ficheiro de análise praticamente não tem fórmulas, apenas gráficos e tabelas - a maioria dinâmicos – e relatórios, a dimensão do ficheiro influencia o espaço físico por este ocupado e o tempo de abrir e salvar o ficheiro, mas as operações de manipulação dentro deste são rápidas e sem qualquer tipo de redução de velocidade.

Todas as folhas do ficheiro EXCEL apresentadas neste relatório – incluindo gráficos, tabelas, relatórios e toda a restante informação a apresentar - foram desenvolvidas, de raiz, para facilitar as análises realizadas e a utilização da ferramenta a levar a cabo tanto durante o projeto de dissertação, como para utilização futura na empresa. Com o desenvolvimento da ferramenta foi possível obter uma grande variedade de análises de interesse, e também ter uma maior profundidade e confiança nas análises realizadas. Passou a ser, então, possível reconhecer as causas para alguns problemas que anteriormente se suspeitava que pudessem existir, mas que não havia uma forma direta e suportada por dados de as identificar.

A primeira folha que é apresentada ao utilizador mostra uma visão geral do conjunto de equipamentos, como é apresentado na Figura 15 e em detalhe da Figura D-1 à Figura D-4 do Anexo D. Nesta apresentação inicial dos dados, o objetivo é mostrar a informação de forma clara e imparcial, para que seja o utilizador a decidir o rumo a seguir com a sua análise. Se se tivesse optado por apresentar logo a evolução dos estados que são historicamente mais críticos, como o *Speed Loss* ou o *Oversampling*, poder-se-ia levar o utilizador a seguir um determinado caminho para a análise e assim condicionar a linha de pensamento. Deste modo, procurou-se apresentar a informação de forma gráfica, organizando o espaço de ecrã disponível em blocos de informação e tentando sempre manter uma interface simples, fácil de utilizar e limpa, para melhorar a experiência do utilizador.

No topo desta folha, é apresentada a evolução semanal da utilização dos equipamentos. De seguida, é realizada uma análise ao OEE das máquinas, de acordo com o que foi apresentado na Secção 4.3, com um gráfico em cascata, os valores médios de ocupação temporal de cada estado e, à direita, o OEE e os valores dos três termos que permitem calcular este indicador. Ao clicar no nome de cada estado – ou na caixa com o valor de ocupação -, dentro do bloco com as médias, o utilizador é automaticamente encaminhado para a folha com a análise do respetivo estado, que serão apresentadas nos parágrafos seguintes. À direita, está disponível um conjunto de botões que permitem filtrar os dados a apresentar por equipamento, dia, semana ou mês.

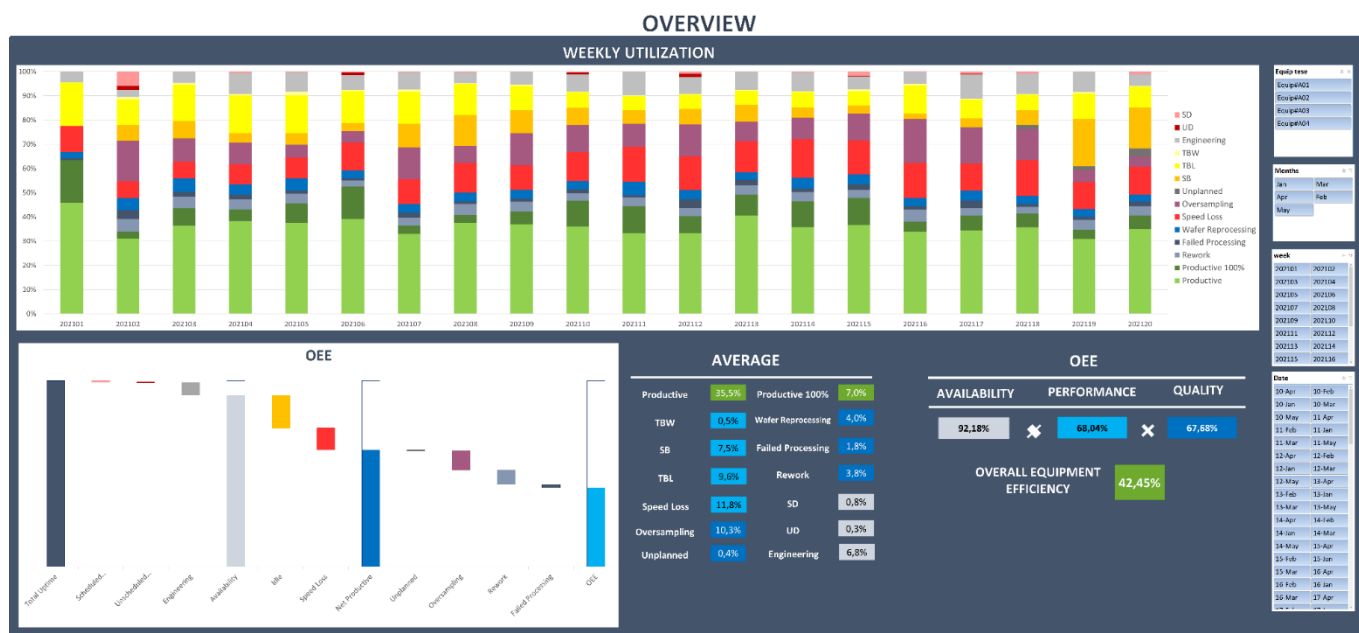


Figura 15 - Visão geral do conjunto de equipamentos da família A, ao longo das primeiras vinte semanas de 2021

Depois de analisar esta folha, o utilizador é convidado a avançar para a folha seguinte, onde está disponível um conjunto de quatro gráficos com a utilização dos equipamentos agrupada por mês, semana, dia e equipamento. Os gráficos disponíveis são semelhantes ao primeiro apresentado e também é possível filtrar de forma simples e intuitiva. O código de cores para os estados é sempre o mesmo ao longo de todas as folhas, para facilitar a leitura dos gráficos e manter um aspeto uniforme dos mesmos. Nas Figura D-5 a Figura D-8 do Anexo D, são apresentados em detalhe os gráficos desta folha com as várias interpretações da utilização.

Devido à facilidade de obtenção dos dados de utilização – e das restantes informações disponibilizadas pela ferramenta – e ao interesse por ter um maior controlo sobre as máquinas, passou a realizar-se uma análise da evolução da utilização dos equipamentos, duas vezes por semana. Para facilitar esta análise, foi criado um relatório de suporte, obtido automaticamente para uma análise comparativa entre os dias selecionados, como apresentado na Figura D-9 do Anexo D. Este relatório diminui consideravelmente o tempo despendido na análise da evolução da utilização dos equipamentos. Uma tarefa que demorava cerca de meia hora – incluindo a redação de um simples relatório por escrito – passou a demorar cinco a dez minutos.

Nas folhas seguintes são analisados os catorze estados apresentados. As folhas são muito semelhantes para quase todos os estados, exceto para o caso de *Speed Loss* por ser um estado que merece maior atenção pela elevada representatividade que tem em número total de horas e por ter normalmente alguma margem de correção. A folha de *Wafer Reprocessing* também difere das restantes por incluir gráficos para analisar o número de *wafers* que foram reprocessadas, para além do tempo ocupado em reprocessamentos.

Toda a informação a partir da qual são desenvolvidas as diferentes análises encontra-se armazenada numa tabela, disponível na última folha deste ficheiro. Dada a dimensão da tabela, em especial, em termos de linhas, optou-se por ter apenas valores nesta tabela, para melhorar a utilização da componente de análise da ferramenta.

Para apresentar as folhas relativas a cada estado, selecionou-se, como exemplo, o *Failed Processing*. A folha relativa a este estado começa com uma tabela com o número de horas acumuladas por cada produto e por semana, como apresentado na Figura D-10 do Anexo D. Os produtos estão ordenados por ordem decrescente de número de horas nesse estado, para as semanas selecionadas. Ainda nesta tabela, é também possível identificar quais foram os casos

– combinação de produtos e semanas – que tiverem mais horas acumuladas no estado em análise. Fazendo uso das funcionalidades das tabelas dinâmicas do EXCEL, ao clicar duas vezes numa célula é criada uma folha à parte com uma nova tabela com todos os campos – colunas – da tabela original, filtrada para a semana e produtos correspondentes à célula selecionada. Isto facilita um estudo mais aprofundado de casos específicos. Depois de analisar a tabela e identificar alguns produtos a estudar, o utilizador tem disponível um gráfico com a evolução temporal do número de horas acumuladas no estado selecionado, como exemplificado na Figura D-13 do Anexo D. Podem ser aplicados filtros por produto, por *step* ou por semana, e estes filtros estão ligados tanto ao gráfico da evolução temporal como à tabela no início da folha.

O campo “Produto” pode ser expandido, sendo adicionadas colunas para os *steps* que o produto realizou. Um exemplo desta expansão é apresentado na Figura D-11, para um produto, no estado de *Failed Processing*. De forma similar, é possível analisar a repartição do tempo, na semana selecionada, por equipamento. Na Figura D-12 está representada a distribuição do número de horas numa semana para quatro equipamentos. O aumento do grau de detalhe da informação apresentada é refletido não só na tabela, como também no gráfico da evolução semanal. Desta forma, é possível realizar uma análise de forma rápida e direta para identificar os produtos, *steps*, lotes ou *wafers* que causam uma acumulação de horas num dado estado.

Na folha inicial identifica-se o estado que se pretende analisar. Selecionando o mesmo, navega-se até ao separador com o respetivo estado detalhado. Na folha do estado, rapidamente se identificam, através do código de cores, os produtos e semanas a estudar, podendo expandir o nível de divisão a equipamentos dentro de semanas e a *steps* dentro de produtos. Com os casos a estudar identificados, pode-se gerar uma folha específica, relativa ao produto, semana e, possivelmente, *step* e equipamento. Nesta folha auxiliar é possível identificar rapidamente os lotes que passaram nestas condições, assim como as transações de todas as *wafers* desses lotes. A identificação dos lotes, *wafers* e *steps* permite um estudo individualizado, através das funcionalidades da ferramenta de *Material Tracking*, destas unidades em específico: ver o histórico com todas as informações das operações realizadas, notas de processamento levantadas na linha, informações ou pedidos especiais, entre outros dados. Com esta análise passa a ser possível identificar a causa raiz da acumulação de tempo num qualquer estado, ou pelo menos, identificar o lote e *step* para transmitir aos departamentos de Processo e de Produção para identificar as causas quando estas não estão evidenciadas.

O *Speed Loss*, para além de uma folha análoga à apresentada para o *Failed Processing*, tem uma outra folha que permite uma análise mais detalhada, e que inclui os relatórios apresentados na Figura D-14 e na Figura D-21 do Anexo D. Nesta análise, o *Speed Loss* acumulado corresponde à soma da diferença entre o RTT medido e o RTT *target* para cada produto, em cada *step*, e na semana em que foi processado. Esta diferença tanto pode ser positiva, se o tempo de cadência for superior ao alvo de produção, como negativa, se for inferior. *Speed Loss* positivo, indesejável, é apresentado a vermelho e o negativo é apresentado a verde. No caso de se verificar um *Speed Loss* positivo elevado, é necessário investigar as suas causas para corrigir esta situação e diminuir o tempo de cadência. No caso oposto, se se verificar um *Speed Loss* negativo elevado, provavelmente os alvos de tempo de cadência são demasiado conservadores e podem ser reformulados.

Primeiro, é sugerida uma análise do *Speed Loss* por equipamento, por meio do relatório da Figura D-14. Os diferentes gráficos disponíveis neste relatório podem ser analisados com maior detalhe no Anexo D. Este relatório começa com um gráfico do *Speed Loss* acumulado para os equipamentos em estudo, apresentado na Figura D-15. Destes, seleciona-se um – ou mais – e é apresentada a evolução cronológica do *Speed Loss* acumulado em cada dia para o equipamento em análise, como demonstra o gráfico da Figura D-16. Analisando esta evolução, escolhe-se o período que se pretende estudar, para não ter dados relativos as outras semanas a deturpar os

resultados das análises. É depois apresentado um gráfico idêntico ao da Figura D-17, com o número de horas de *Speed Loss* acumuladas para o equipamento e para as semanas sob investigação, por produto. Este gráfico está organizado por ordem decrescente do número de horas de *Speed Loss* e permite identificar quais os produtos com maior número de horas acumuladas a produzir acima do alvo de cadência. Um gráfico com a evolução temporal da diferença acumulada entre o RTT medido e o alvo, para os produtos selecionados, exemplificado na Figura D-18, é apresentado para verificar se este é um problema recorrente ou se se consegue identificar alguma tendência. Por fim, são apresentados dois últimos gráficos, relativos aos *steps* realizados pelos produtos selecionados, no equipamento e no período em análise. No gráfico da Figura D-19 é possível analisar o número de horas de *Speed Loss* acumuladas, por *step*, por produto e por equipamento, assim como o número de *wafers* que realizou cada *step*. No último gráfico do relatório, apresentado na Figura D-20, pode-se analisar a evolução temporal do *Speed Loss* nos *steps* selecionados, com o objetivo análogo ao do gráfico da evolução temporal por produto.

Depois, o utilizador pode realizar uma análise por produto, através do relatório da Figura D-21. Os gráficos apresentados neste relatório, assim como o tipo de análise realizada, são análogos aos apresentados no parágrafo anterior, e estão apresentados no Anexo D. No gráfico da Figura D-22 é apresentado, o *Speed Loss* acumulado por cada produto, para o período de tempo selecionado. A seguir, é apresentado o gráfico da Figura D-23 com a evolução temporal do *Speed Loss* acumulado em cada dia para os produtos selecionados. Depois, está disponível um gráfico com a distribuição do número de horas acumuladas de *Speed Loss* por equipamento, para os produtos selecionados, como na Figura D-24. O último gráfico deste relatório, apresentado na Figura D-25, representa a evolução temporal dos produtos selecionados, nos equipamentos selecionados, para o período em análise. Com os equipamentos e produtos selecionados, o utilizador pode retornar ao primeiro relatório para aprofundar a análise relativamente aos *steps* realizados.

Por fim, na folha específica para o *Wafer Reprocessing* é apresentada, no início, uma análise semelhante aos restantes estados, e, depois desta, estão disponíveis mais alguns gráficos relativos ao número de *wafers* reprocessadas. Em linha com as restantes análises, e depois de definir os produtos e semanas a estudar – numa análise semelhante à apresentada para o *Failed Processing* – é possível analisar o número de *wafers* reprocessadas. O primeiro gráfico do relatório mostra o número de *wafers* processadas na coluna a azul e o número de reprocessamentos, indicado com um triângulo a vermelho, para o(s) produto(s) em análise. Pode-se escolher o nível da informação a apresentar, sendo que os gráficos com os diferentes níveis de informação estão disponíveis no Anexo D. Começando pelo nível mais elevado, como representado na Figura D-26, temos os valores absolutos agrupados por produtos. Os produtos podem ser desagregados por *steps*, de acordo com o gráfico da Figura D-27. Depois, pode-se separar os *steps* por equipamento, como demonstrado na Figura D-28. Este é o último nível de informação apresentado no relatório. O relatório termina com a evolução temporal do número de *wafers* processadas e reprocessadas, de acordo com o nível de informação selecionado no gráfico acima, logo por produto, por *step* ou ainda por equipamento, de forma idêntica aos gráficos apresentados na parte inferior dos relatórios presentes no Anexo E.

4.8 Comparação dos resultados apresentados pela ferramenta com o CERBERUS

Com a parte de desenvolvimento da ferramenta concluída, importa fazer uma análise crítica dos resultados e comparar a informação apresentada por esta ferramenta com a disponibilizada pelo *software* utilizado, neste caso, o CERBERUS. Na Figura 16 é apresentada uma comparação entre os dados obtidos pela ferramenta e pelo CERBERUS, para elementos da família A, relativos ao mês de março. Analisando a Figura 16, torna-se evidente o interesse do objetivo

principal da ferramenta, que é determinar com detalhe a repartição da utilização de um conjunto de máquinas, para melhor definir a capacidade produtiva. Comparando os pares de colunas de cada equipamento, pode-se verificar que existe uma boa correspondência entre os dados exportados do CERBERUS e os extraídos da ferramenta. A principal diferença encontra-se no tempo que a máquina está a realizar operações produtivas. Se se seguisse uma análise apenas com base no CERBERUS, para este conjunto de dados concluir-se-ia que estes equipamentos da família A, em março de 2021, estiveram em média 87% do tempo em modo produtivo. Utilizando a ferramenta, para os mesmos equipamentos e para o mesmo período, este conjunto da família A esteve a realizar operações efetivamente produtivas apenas 42% do tempo. A restante parte do tempo é atribuída a operações que não são produtivas, como reprocessamentos, processamento de *wafers* acima do alvo de amostragem ou durante um período acima do alvo de cadência, entre outras. Esta diferença tem um grande impacto no planeamento de capacidade, e também, na gestão dos equipamentos da fábrica, e levou a ações para corrigir a percentagem de tempo produtivo considerada no planeamento e para procurar aumentar este valor.

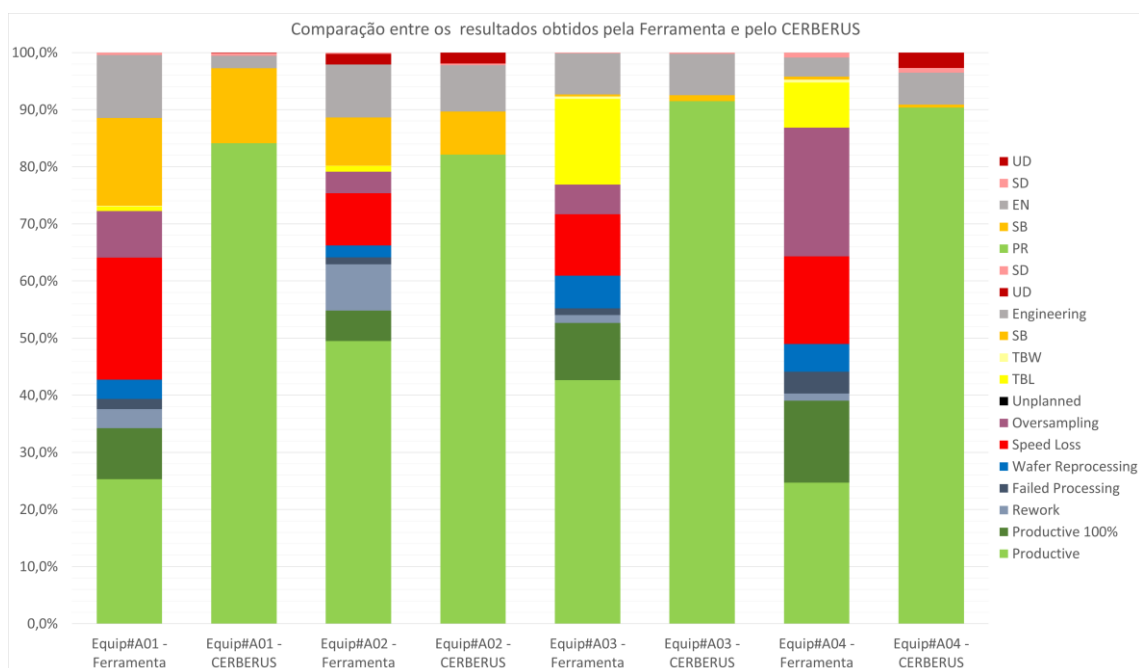


Figura 16 - Comparação entre os resultados obtidos pela ferramenta e apresentados pelo CERBERUS, para a família A, relativos ao mês de março de 2021

As diferenças para o CERBERUS, em termos de tempo de engenharia estão relacionadas com a definição deste tempo. No CERBERUS, este tempo diz respeito ao processamento de produtos de engenharia, ou ao tempo despendido em atividades de engenharia. Na ferramenta pode dizer respeito ao processamento dos produtos de engenharia, que, por vezes, podem passar no CERBERUS como tempo associado a PR, ou ao tempo em que o equipamento está no estado TBL ou *Failed Processing* e no CERBERUS o estado encontrado é EN. Quando o equipamento está parado, o cruzamento de dados com o CERBERUS ainda pode ser otimizado, como discutido nos trabalhos futuros.

Existe agora uma ferramenta fácil de utilizar, implementada em EXCEL – logo, fácil de manipular –, transversal a diversas famílias de equipamentos e que apresenta resultados congruentes com a realidade para o tempo em que o equipamento está em funcionamento, com um detalhe que não era possível obter e que tem em consideração todas as transações de todas as *wafers* processadas.

5 Oportunidades de melhoria na utilização dos equipamentos

Depois de terminado o desenvolvimento da ferramenta, recorreu-se às funcionalidades da mesma para identificar oportunidades de melhoria no funcionamento dos equipamentos estudados e que, até então, não era possível identificar.

O estudo das categorias de perdas a examinar começa com uma Análise de Pareto para identificar as perdas prioritárias de forma imparcial e distanciada da influência de qualquer outra parte e interesse. Esta informação é analisada e debatida, de forma a alinhar as prioridades com a realidade da empresa no momento em questão. Por vezes, torna-se imperativo dar prioridade à resolução de problemas esporádicos e sem grande impacto numa visão global a longo-prazo, mas que são críticos num dado momento para o funcionamento da empresa e da fábrica. Para as oportunidades identificadas, estabelece-se planos de ação para resolvê-las e, depois de pôr estes planos em prática, há que apresentar e avaliar os resultados obtidos. Será dada uma atenção especial às semanas w202108 a w202120 porque durante as primeiras sete semanas de 2021 um dos equipamentos da família A esteve parado devido uma avaria. A contabilização das semanas iniciais viria a prejudicar a *performance* deste conjunto de equipamentos, quando o mais interessante é analisar o normal funcionamento dos equipamentos e encontrar oportunidades de melhoria nesses momentos.

5.1 Categorias de perdas a estudar

Para uma correta identificação das oportunidades de melhoria serão utilizadas, em conjugação com a ferramenta desenvolvida em EXCEL, algumas das ferramentas de qualidade para processos de melhoria contínua. As ferramentas a utilizar são a Análise de Pareto, apresentada na Secção 2.4.1, e o Diagrama de Ishikawa, discutido na Secção 2.4.2. A Figura 17 representa a Análise de Pareto das perdas de OEE entre as semanas w202108 e w202120.

Antes de analisar a Figura 17, importa referir que os termos de *Idle* e de *Rework* resultam da agregação de diferentes estados, sendo que os restantes termos correspondem a um único estado. *Idle* é o conjunto de tempo em que o equipamento está parado, logo no estado de TBW, de TBL ou de SB. *Rework* representa não só o tempo em que o equipamento está em *Rework*, mas também o tempo em que a máquina está a reprocessar *wafers*, ou seja, *Wafer Reprocessing*.

Retomando a Figura 17, verifica-se que as perdas mais significativas estão associadas a *Idle*, depois os tempos perdidos por *Speed Loss*, por *Oversampling* e por *Rework* são os mais críticos. Estas quatro causas são responsáveis por mais de 80% das perdas de disponibilidade produtiva, pelo que serão as investigadas nesta Secção. O tempo em *Engineering* é considerado como perda de disponibilidade do ponto de vista puramente produtivo, mas como está associado a ações necessárias de engenharia, o rótulo de perda pode ser demasiado depreciativo.

Com os estados que representam as maiores perdas de disponibilidade identificadas, foram procuradas as causas para estas perdas, caso a caso.

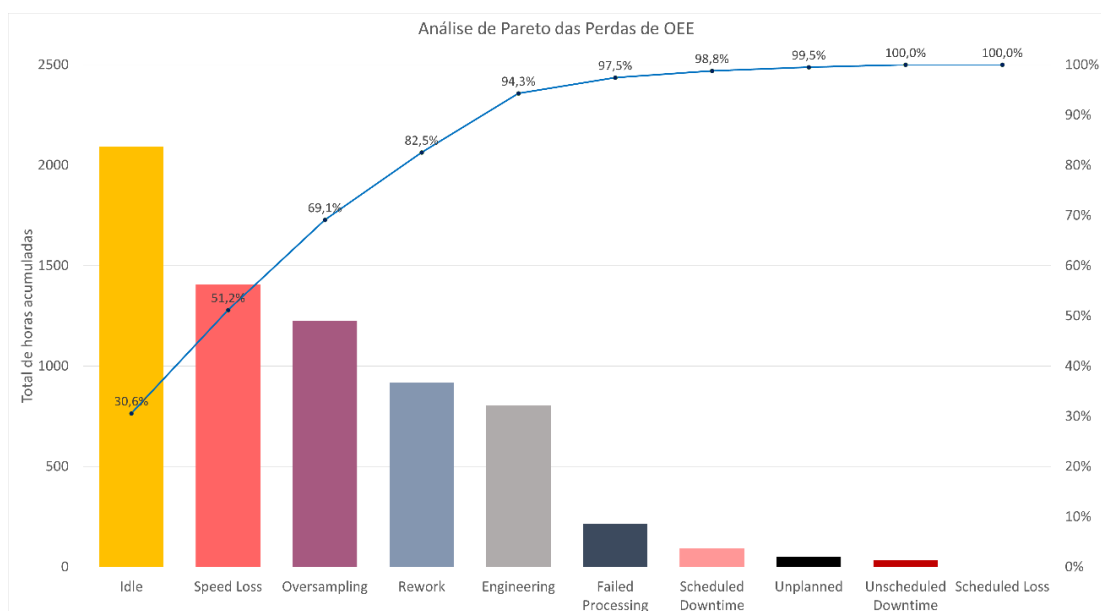


Figura 17 - Análise de Pareto das perdas de OEE, na família A, entre as semanas w202108 e w202120

5.1.1 Idle

O valor elevado de perdas por *Idle* prende-se, em boa parte, com a definição do próprio estado. Este estado corresponde a todos os momentos em que a máquina esteve parada, sem ter sido encontrada correspondência com os estados de UD, SD e EN no CERBERUS. Esta diferença na correspondência pode dever-se, em parte, ao facto de a ferramenta apenas atribuir o tempo correspondente a um estado do CERBERUS durante o intervalo em que o equipamento não estava a processar material. Uma diferente correspondência com os estados do CERBERUS, apontada para trabalho futuro, pode vir a reduzir o tempo em *Idle*, aumentando o UD, SD e EN.

Ainda dentro do *Idle*, considerando os três estados que o compõem, podem existir causas diferentes para o tempo associado a cada um deles. O SB pode dever-se à falta de operador, à falta de *Work in Progress* (WIP) para iniciar o processamento de novos lotes ou à falta de receita num equipamento com as operações a realizar, em cada produto, num determinado *step*. O TBL e o TBW podem ser elevados pelo motivo exposto no parágrafo anterior, incapacidade de caracterizar todos os estados do CERBERUS na ferramenta. Também pode ser TBL e TBW real e produtivo, ou seja, o tempo que um equipamento demora na troca dos lotes e o tempo de transição entre acabar de processar uma *wafer* e começar uma nova. Numa das visitas à linha de produção verificou-se que, por norma, para equipamentos que podem ter mais do que uma *wafer* no seu interior, o TBW era muito reduzido ou praticamente nulo. Sobre o TBL constatou-se que, quando estava um operador disponível e existia WIP no local e com ordem para ser processado, era um processo relativamente rápido, na casa das dezenas de segundo até cerca de um minuto, logo, algumas ordens de grandeza inferior em comparação com o processamento de uma única *wafer*.

O tempo associado a TBL, TBW e SB ficou devidamente identificado e é agora possível transmitir esta informação ao Departamento de Produção, para tentar reduzir o valor do tempo acumulado nestas perdas.

5.1.2 Speed Loss

Para analisar o *Speed Loss* recorreu-se à folha com o relatório específico para este estado. A análise começou com o estudo por equipamento. No gráfico da Figura 18 é evidente que a máquina Equip#A01 é a que tem maior *Speed Loss* acumulado e esta será o alvo da análise.



Figura 18 - Speed Loss acumulado por equipamento, para equipamentos da família A, entre w202101 e w202120

O passo seguinte é a análise da evolução do *Speed Loss* acumulado neste equipamento por dia. Para esta análise selecionou-se todo o período em estudo, logo para as primeiras vinte semanas de 2021, porque está a ser estudado o Equip#A01 isolado dos restantes e então a paragem prolongada do outro equipamento não tem influência. Ao analisar o gráfico da Figura 19 verifica-se que nas primeiras sete semanas do ano existia algum *Speed Loss* acumulado, com alguma variabilidade e em torno das 2 h diárias. A partir da semana w202108, mais concretamente, dia 8 de fevereiro – que coincide com o dia em que o equipamento que esteve parado voltou a estar operativo – a variabilidade do *Speed Loss* acumulado aumentou bastante. Entre as semanas w202108 e w202120 a variabilidade é muito elevada, com o *Speed Loss* acumulado entre, aproximadamente, 2 e 8 h diárias, com vários dias com picos a atingir 10 h e com uma média superior a 4 h. Esta é uma situação crítica e é essencial encontrar as causas que levam a este acumular de tempo de processamento acima do *target*.

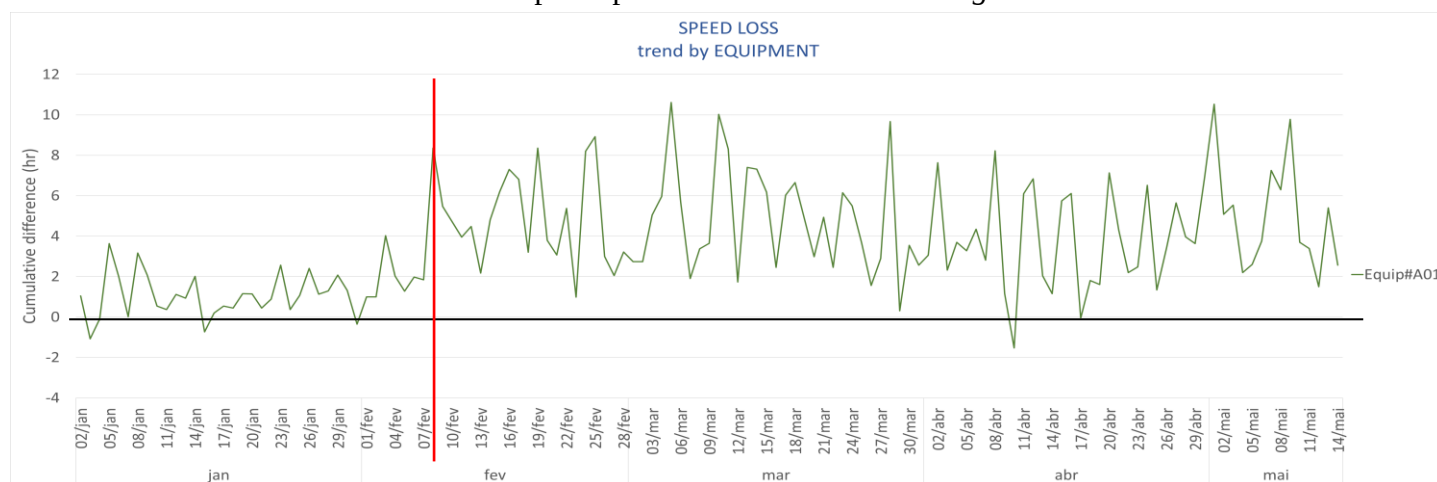


Figura 19 - Evolução do Speed Loss acumulado no Equip#A01, ao longo das primeiras vinte semanas de 2021

Com o equipamento – Equip#A01 – e o horizonte de análise identificados, o passo seguinte consiste em identificar os produtos com mais *Speed Loss* acumulado. Um gráfico que apresenta o *Speed Loss* acumulado por produtos ordenado de forma decrescente foi analisado, idêntico ao gráfico da Figura D-15, do Anexo D, para comparar os diferentes produtos nesta categoria de perdas. A partir deste gráfico torna-se evidente realizar uma simples Análise de Pareto para identificar os produtos a estudar, como demonstrado na Figura 20. Com esta análise é possível concluir que um grupo de sete produtos é responsável por quase 80% das perdas associadas ao *Speed Loss*. Então, estes são os sete produtos a analisar no passo seguinte: Prod#03, Prod#07, Prod#08, Prod#32, Prod#44, Prod#46 e Prod#48.

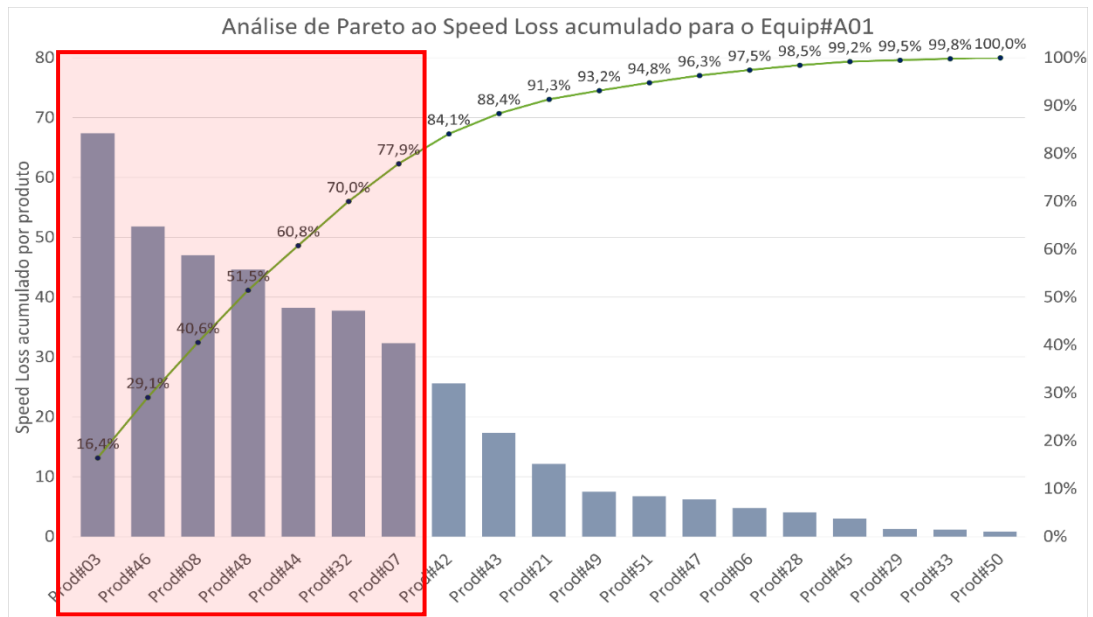


Figura 20 - Análise de Pareto ao Speed Loss acumulado no Equip#A01, por produto, entre w202108 - w202120

De seguida, foi analisado o gráfico da Figura D-29 do Anexo D, que permite analisar a evolução do *Speed Loss* acumulado por dia, para os produtos definidos no parágrafo anterior, no conjunto de semanas que tem vindo a ser analisado. Optou-se por disponibilizar este gráfico apenas em anexo para o apresentar com o maior detalhe possível, uma vez é de difícil interpretação fora da ferramenta – onde se pode variar o *zoom*, as cores e escolher os produtos selecionados –, dado o número considerável de produtos. A análise do gráfico permitiu concluir que o Prod#48 era um produto com grande variabilidade e muito tempo acumulado em *Speed Loss* por dia, mas que, desde meados de março não tem passado muito na linha de produção, pelo que se irá focar apenas nos seis produtos restantes. Outra informação retirada deste gráfico é que todos os produtos têm dias com valores de *Speed Loss* nulos ou abaixo de zero. Isto permite concluir que é possível atingir os tempos de *target*, e, por vezes, produzir abaixo destes, pelo que se pode descartar a possibilidade ser necessário rever certos *targets* de tempo de cadência.

Para os seis produtos ainda em análise - Prod#03, Prod#07, Prod#08, Prod#32, Prod#44, Prod#46 -, foi avaliado o tempo acumulado em *Speed Loss* e o número de *wafers* que passaram de cada produto em cada *step*, como apresentado na Figura 21.

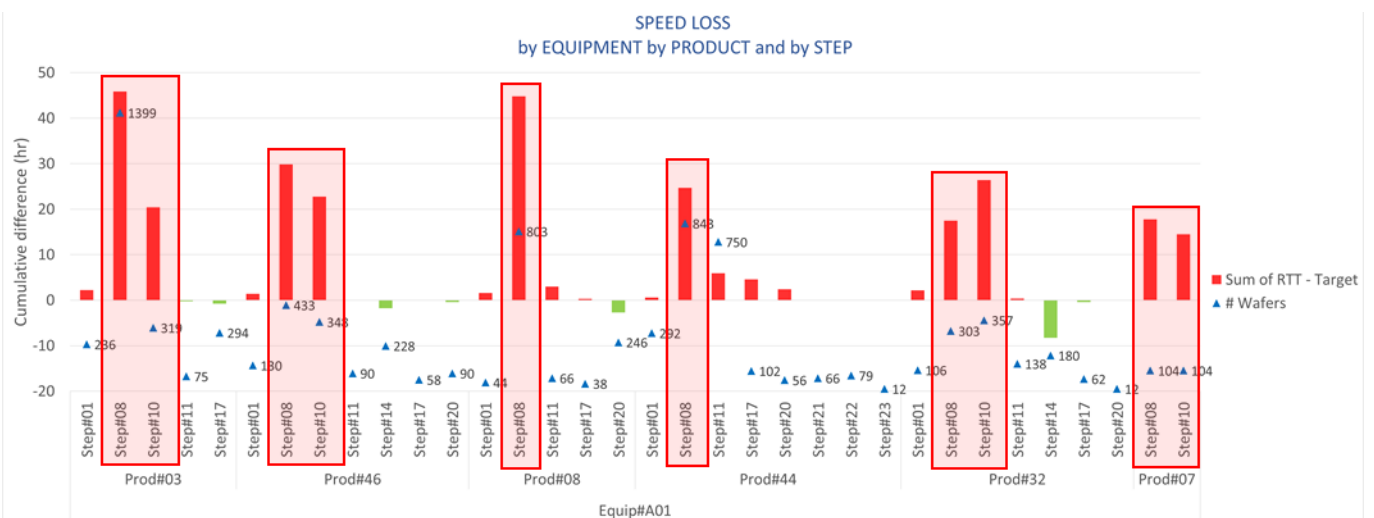


Figura 21 - Speed Loss acumulado e wafers processadas, por step, no Equip#A01, entre w202108 - w202120

Ao analisar a Figura 21, pode-se verificar que dois *steps* têm muito mais *Speed Loss* acumulado que os restantes, o Step#08 e o Step#10. O Step#08 está presente em todos os produtos e é o *step* com mais *Speed Loss* acumulado em todos os produtos, exceto no Prod#32 em que é o Step#10. O Step#10 é realizado por todos os produtos, menos pelos Prod#08 e Prod#44, e tem consistentemente bastante *Speed Loss* acumulado, e se for tido em conta o facto de processar um número inferior de *wafers* ainda mais crítico este *step* deve ser considerado.

Para terminar a análise do *Speed Loss* falta analisar a evolução temporal destes *steps*, para verificar se são problemas sistemáticos que provavelmente obrigariam a rever o processo produtivo, ou se se devem a situações esporádicas, de identificação e correção mais direta. Esta evolução temporal é apresentada na Figura 22, onde se pode verificar uma enorme variabilidade no *Speed Loss* acumulado, e com valores bastante elevados para *steps* isolados.

Também se podem verificar casos com *Speed Loss* abaixo do zero, o que indica que o tempo de cadência definido como alvo pode ser alcançado. Uma vez que estes acontecimentos são extremamente raros, apenas em dois dias por *step* num horizonte de treze semanas, pode ser necessário rever os *targets*, mesmo estes sendo alcançáveis.

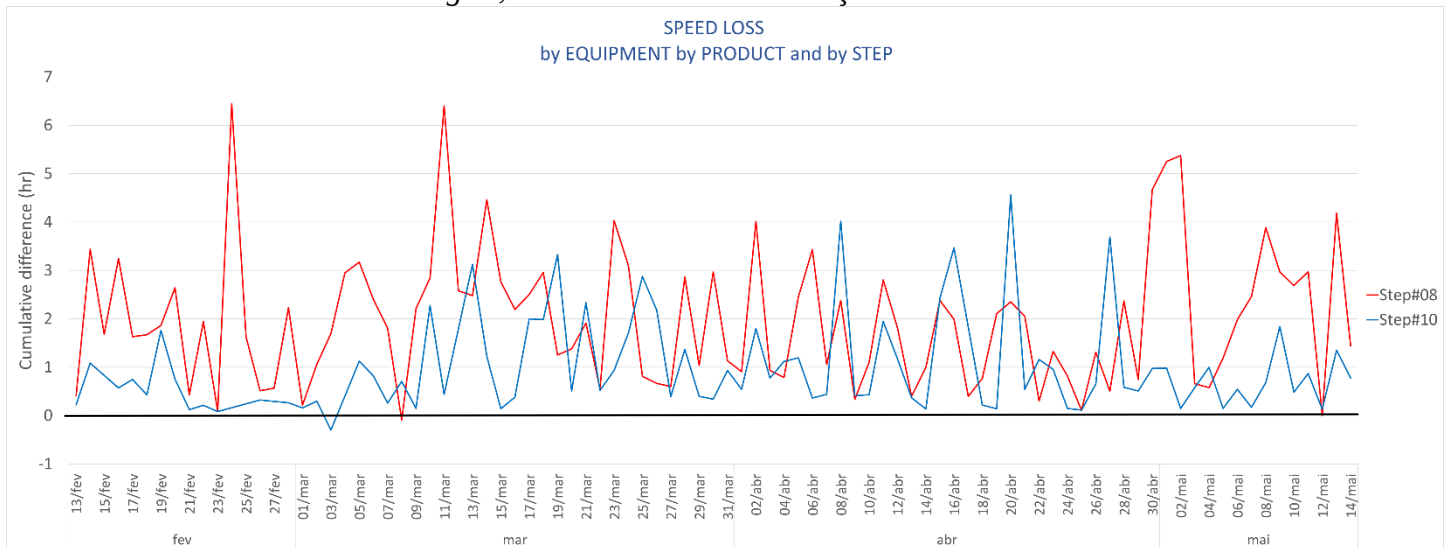


Figura 22 - Evolução diária do Speed Loss no Step#08 e no Step#10, no Equip#A01, entre w202108 - w202120

Através da realização de um conjunto de análises similares à apresentada, para diferentes produtos e *steps*, e por meio de visitas à linha de produção e reuniões com engenheiros de diferentes departamentos, foi desenvolvido o Diagrama de Ishikawa apresentado na Figura 23. Neste diagrama é possível analisar as causas do excesso de *Speed Loss* no Equip#A01, associadas ao método utilizado no processamento – nas medições –, à máquina, aos produtos processados, ao manuseamento por parte dos operadores, à medida utilizada nestas operações de medição e ao meio ambiente da linha de produção, que é rigorosamente controlado.

A principal conclusão a retirar desta análise é a necessidade de analisar com o Departamento de Processo o Step#08 e o Step#10, em especial nos produtos: Prod#03, Prod#07, Prod#08, Prod#32, Prod#46 e Prod#48, quando processados no Equip#A01. Estas máquinas têm um funcionamento praticamente automático, pelo que normalmente não precisam de assistência. Uma ação determinada para esta situação foi a indicação para ter um operador a dar atenção ao Equip#A01 quando estiver a realizar o Step#08 e o Step#10, em especial nos produtos mencionados, para garantir o correto processamento dos equipamentos. Durante o processamento de um produto, a presença de um operador a dar suporte à máquina garante uma resposta mais rápida aos alarmes que possam surgir. Desta forma é possível reduzir o tempo de processamento e, assim, o *Speed Loss*.

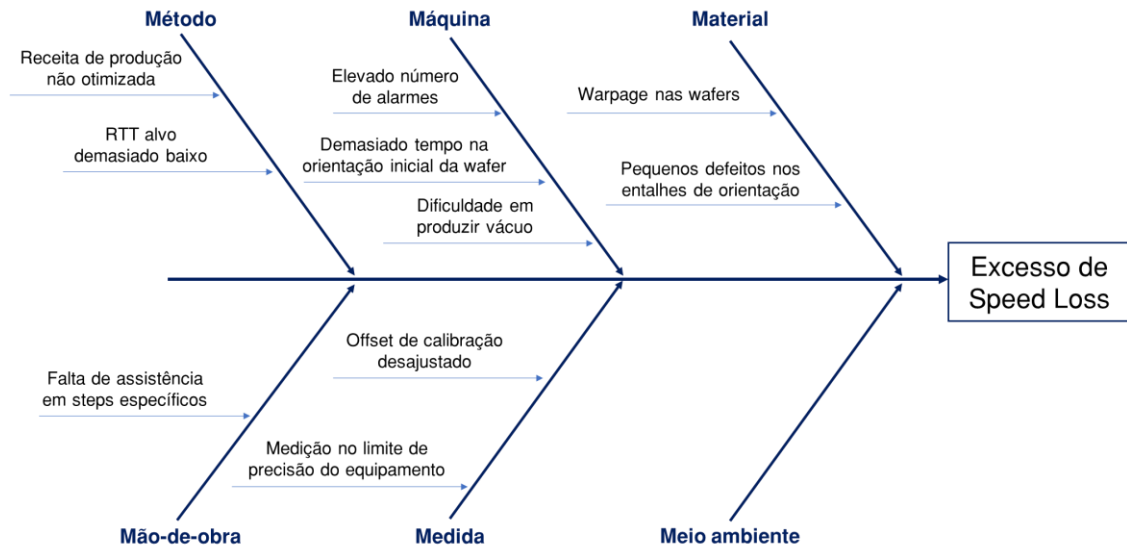


Figura 23 - Diagrama de Ishikawa para o excesso de Speed Loss na máquina Equip#A01

Com a ferramenta passou a ser possível identificar de forma precisa os *steps* e produtos que causam o excesso de *Speed Loss*, e os momentos exatos em que isto acontece, assim como a sua relação com os diferentes equipamentos. Esta capacidade teve um importante impacto, porque permite estudar as causas que levam a esta perda para depois as endereçar e resolver.

5.1.3 Oversampling

A terceira categoria de perdas a analisar está relacionado com o tempo acumulado no estado de *Oversampling*. Ao analisar a Figura 24, verifica-se que entre as semanas w202103 e w202106 existia algum tempo acumulado neste estado, mas com valores não demasiado elevados. No intervalo entre as semanas w202107 e w202118 o número de horas acumuladas a processar *wafers* em excesso de amostragem é bastante superior, com grande variabilidade, e com uma semana – w202116 – com mais de 120 h neste estado. Para colocar este valor em perspetiva, ter entre alguns equipamentos da família A 120 h de *Oversampling* é o mesmo que ter, nos sete dias da semana, uma máquina a processar em contínuo, sem qualquer tipo de tempo em baixo, apenas *wafers* acima do que estava previsto em termos de amostragem, durante cinco dias completos (5 dias x 24 h/dia = 120 h). Estas *wafers* não tinham sido diretamente consideradas no planeamento de capacidade, o que significa que nessa semana, cerca de cinco dias foram ocupados a processar *wafers* acima do planeado. Apesar do planeamento já ter em consideração uma pequena percentagem da utilização alocada à possibilidade de processar *wafers* acima do *target* de amostragem, esta situação tem grandes implicações porque o processamento de *wafers* produtivas terá de ser realizado noutra momento. No entanto, este é um conjunto de equipamentos que é muitas vezes o gargalo do processo produtivo, pelo que não há muita margem para refazer os planos de produção.

A redução do *Oversampling* nas semanas w202119 e w2022120, observada na Figura 24, deve-se, em boa parte, à revisão do plano de ação para o caso da amostragem do lote falhar. Esta revisão ocorreu devido à identificação, ao utilizar a ferramenta, das consequências dos planos anteriores, pelo que a redução desta perda teve na sua génese informação obtida com a ferramenta para suportar os novos planos. A revisão mencionada já tinha sido implementada entre as semanas w202111 e w202112, mas, devido a outros fatores que levaram ao aumento do excesso de amostragem e que terminaram na semana w202118, não teve os resultados esperados imediatamente refletidos.

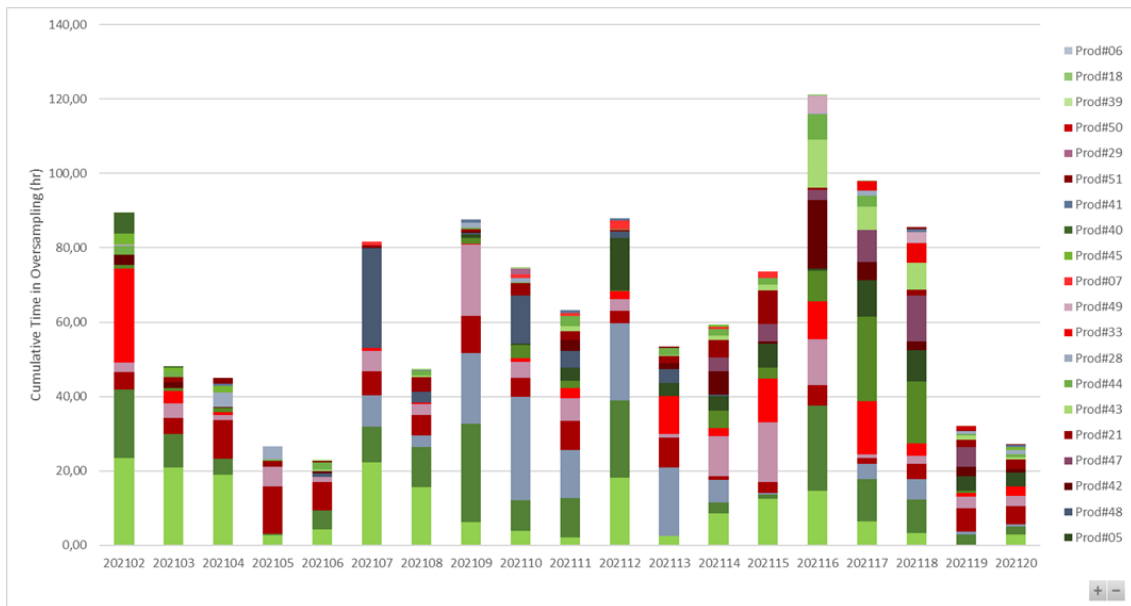


Figura 24 - Evolução do Oversampling nas primeiras vinte semanas de 2021, em equipamentos da família A

Para iniciar o estudo do tempo acumulado nesta categoria de perda, foi realizada uma Análise de Pareto para identificar os produtos com mais tempo acumulado a processar *wafers* acima do alvo de amostragem, como apresentado na Figura 25. Foram identificados nove produtos responsáveis por mais de 80% das perdas, em termos de disponibilidade, por *Oversampling*: Prod#01, Prod#02, Prod#19, Prod#03, Prod#08, Prod#32, Prod#46, Prod#05 e Prod#48.

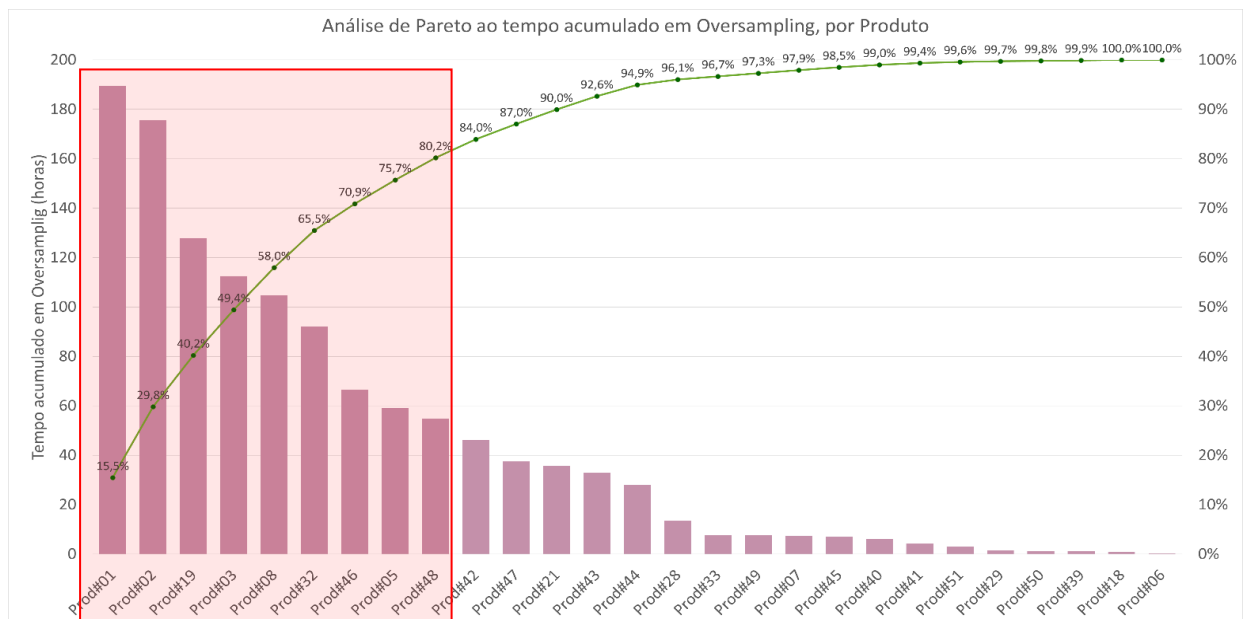


Figura 25 - Análise de Pareto ao Oversampling por produto, na família A, nas primeiras vinte semanas de 2021

Com estes produtos identificados, avaliou-se a distribuição do excesso de amostragem por equipamento, para averiguar se algum equipamento poderia ser responsável pelo *Oversampling*. Esta hipótese foi levantada porque um dos motivos para existir excesso de amostragem resulta da ultrapassagem dos limites de tolerância de um certo número de *wafers* de um lote, num equipamento. A resposta a esta situação passa, normalmente, por medir as restantes *wafers* do lote, para verificar se essas também têm defeitos. Esta medição das restantes *wafers* significa que o número de *wafers* medidas será superior ao alvo de amostragem, pelo

que estão em excesso de amostragem. Ora, a falha de medição inicial pode não estar ligada apenas ao lote, mas também pode estar associada ao equipamento.

Esta hipótese pode ser aprofundada recorrendo ao gráfico da Figura 26, que permite analisar o *Oversampling* acumulado, por produto, em cada equipamento, ao longo das primeiras vinte semanas de 2021. Pela análise da Figura 26, verifica-se que a maioria dos produtos em excesso de amostragem são processados na máquina Equip#A04.

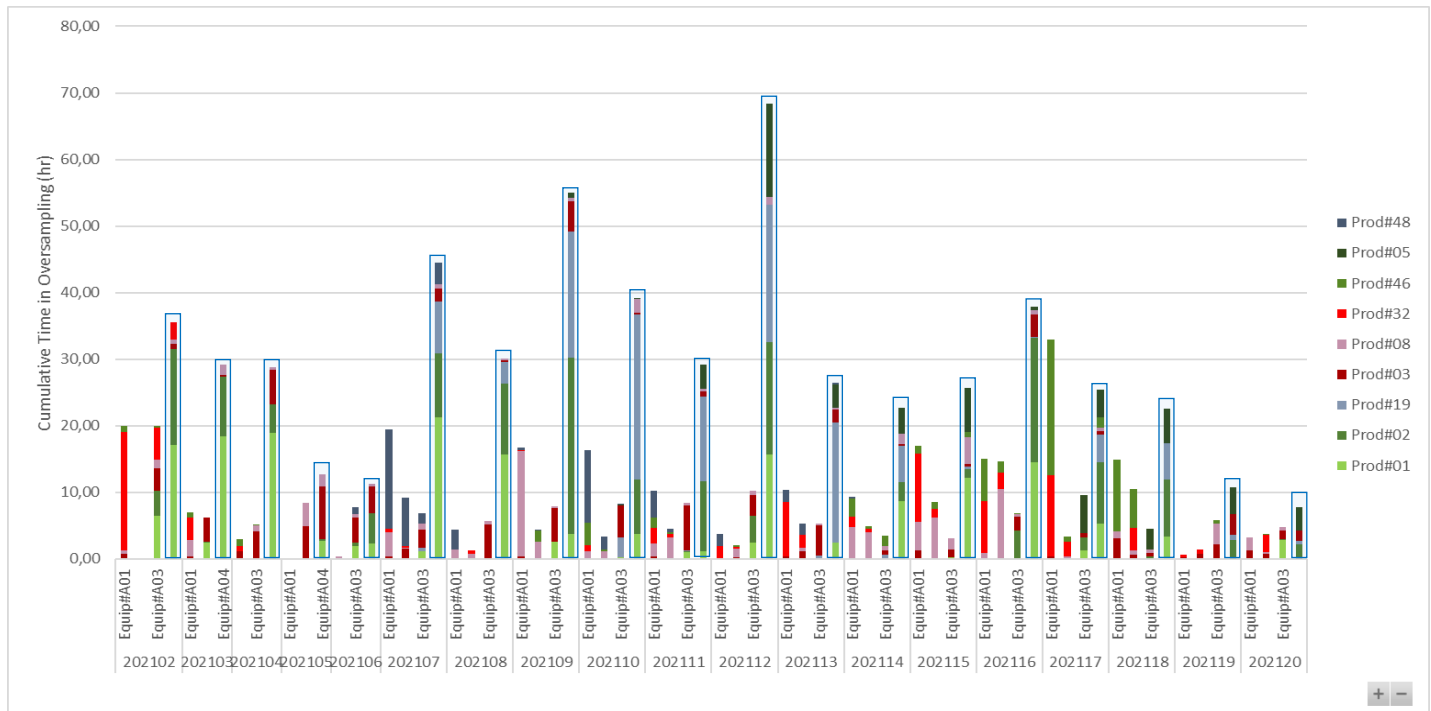


Figura 26 - Oversampling acumulado por equipamento em cada uma das primeiras vinte semanas do ano, relativo aos produtos Prod#01, Prod#02, Prod#19, Prod#03, Prod#08, Prod#32, Prod#46, Prod#05 e Prod#48

Este facto pode dever-se, efetivamente, à falha de medição dos produtos que passam neste equipamento, ou então ao processamento de *wafers* de lotes que falharam a amostragem noutros equipamentos. Quando um lote falha a amostragem, as restantes *wafers* podem ser processadas num outro equipamento, de forma a eliminar o fator máquina da medição. Assim, o *Oversampling* do Equip#A04 pode resultar de falhas de processamentos noutros equipamentos. Esta questão foi colocada ao Departamento de Produção e, com efeito, a segunda hipótese veio a ser confirmada. O Equip#A03 e o Equip#A04 são similares, mas o Equip#A04 tem um maior número de receitas⁶ atribuídas, logo pode processar uma maior variedade de produtos. Por este motivo, todos os produtos que podem passar no Equip#A03 vão para este equipamento, sendo assim dada prioridade ao Equip#A03. Quando um lote falha no Equip#A03, as restantes *wafers* são processadas no Equip#A04, logo as que passam no Equip#A03 são produtivas e este fica com pouco *Oversampling*, e as que passam no Equip#04 estão em excesso de amostragem. No caso de um lote de 25 *wafers* em que a amostra de três falha no Equip#A03, essas três são produtivas, as restantes 22 são processadas no Equip#A04 e são excesso de amostragem. Isto explica uma boa porção do elevado tempo acumulado neste estado no Equip#A04.

A análise do *Oversampling* é um pouco distinta da análise dos outros estados porque, apesar de existirem alguns produtos com excesso de amostragem mais ou menos variável – como é o caso

⁶ Um equipamento tem uma receita quando tem um conjunto de procedimentos associadas a um *step* de um dado produto, para o qual já foi qualificado em termos de melhores configuração de parâmetros e de estudo de *performance* por parte do Engenheiro de Processo.

do Prod#03 e do Prod#08 -, as situações mais críticas referem-se a alguns momentos singulares em que se verificaram picos de *Oversampling*. A Figura 27 expõe esta situação. Na grande maioria dos casos, por produto é normal ter menos de 10 h semanais de tempo a processar *wafers* acima dos *targets* de amostragem. No entanto, existem vários casos em que numa semana um produto tem mais de 20 h de *Oversampling*. Estas situações devem-se a casos específicos e têm de ser estudadas individualmente.

	Prod#01	Prod#02	Prod#19	Prod#03	Prod#08	Prod#32	Prod#46	Prod#05	Prod#48	Prod#42	Prod#47	Prod#21	Prod#43	Prod#44	Prod#28
Row Labels															
# 202102	23,47	18,36	0,00	4,80	2,48	25,25	1,11	0,00	0,00	2,64	0,00	0,00	0,00	2,38	0,19
# 202103	20,86	9,12	0,00	4,20	3,93	3,45	0,79	0,00	0,00	1,54	0,00	1,26	0,00	1,58	0,00
# 202104	18,97	4,28	0,00	10,36	1,44	0,78	1,16	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	3,94
# 202105	2,75	0,31	0,00	12,66	5,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,56	0,00	0,36	3,56
# 202106	4,21	5,13	0,00	7,72	1,29	0,00	0,00	0,00	1,00	0,64	0,00	0,00	0,44	1,81	0,00
# 202107	22,36	9,62	8,35	6,48	5,38	0,83	0,00	0,00	26,80	0,17	0,00	0,61	0,00	0,16	0,00
# 202108	15,62	10,68	3,24	5,52	2,84	0,52	0,00	0,00	2,92	0,00	0,00	3,91	0,27	1,42	0,00
# 202109	6,22	26,51	18,93	9,98	19,19	0,16	1,72	0,84	0,54	0,38	0,00	0,45	0,00	0,52	1,26
# 202110	3,93	8,25	27,66	5,20	4,35	0,86	3,67	0,25	13,03	0,00	0,00	3,21	0,00	0,36	1,01
# 202111	2,10	10,67	12,86	7,84	6,09	2,79	1,84	3,56	4,52	3,01	0,00	2,23	1,41	2,76	0,00
# 202112	18,18	20,78	20,73	3,38	3,05	2,20	0,30	13,99	1,77	0,00	0,00	0,34	0,00	0,18	0,00
# 202113	2,48	0,00	18,45	7,98	1,00	10,15	0,00	3,50	3,89	1,39	0,00	2,01	0,14	2,02	0,00
# 202114	8,65	2,82	6,05	1,03	10,85	2,07	4,68	4,01	0,26	6,42	3,59	4,83	1,09	1,83	0,00
# 202115	12,43	1,28	0,44	2,81	16,17	11,61	2,99	6,55	0,00	0,57	4,74	9,00	1,54	1,69	0,00
# 202116	14,61	22,88	0,13	5,42	12,41	10,15	8,27	0,50	0,00	18,42	2,80	0,63	12,85	6,90	0,27
# 202117	6,49	11,24	4,15	1,67	0,86	14,37	22,67	9,83	0,00	4,82	8,68	0,00	6,31	2,91	1,34
# 202118	3,36	8,85	5,48	4,24	2,11	3,36	16,64	8,35	0,00	2,38	12,47	1,42	7,34	0,00	0,00
# 202119	0,00	2,81	0,80	6,26	3,15	1,05	0,56	4,04	0,00	2,47	5,35	1,80	1,21	0,36	0,89
# 202120	2,91	2,13	0,52	4,99	2,71	2,56	0,08	3,57	0,00	1,10	0,00	2,54	0,47	0,86	1,15
Grand Total	189,60	175,72	127,79	112,54	104,79	92,16	66,49	58,99	54,71	46,15	37,63	35,77	33,06	28,10	13,61

Figura 27 – Representação de parte da tabela com a distribuição do número de horas em *Oversampling*, por produto e por semana, em equipamentos da família A, nas semanas w202101 a w202120

Para estudar os produtos nas semanas que tiveram um tempo acumulado em *Oversampling* extremamente elevado, criou-se uma tabela para cada um destes casos, com os campos da tabela completa com todos os dados. Assim é possível identificar claramente os lotes e *steps* em que se verificou mais tempo acumulado em *Oversampling*, e o momento exato em que cada *wafer* a mais foi processada. Com estas informações pode-se recorrer às ferramentas disponíveis em sistema para obter mais informações dos lotes, em termos de atributos e histórico, e procurar indicações que justifiquem o excesso de amostragem. Na grande maioria dos casos este processo resultou e foi possível apurar a causa para o *Oversampling*. Nos casos em que não se conseguiu encontrar a resposta, foram agendadas reuniões com outros departamentos para transmitir as informações obtidas e tentar identificar as causas, num esforço colaborativo.

Focando nas semanas w202114 a w202118, período que foi estudado inicialmente por corresponder ao mês que precedeu o momento em que a ferramenta começou a ser utilizada e a apresentar resultados congruentes com a realidade, e analisando a Figura 27, é possível identificar alguns picos de *Oversampling*. Para o Prod#46, nas semanas w202117 e w202118 verificou-se 22,7 h e 16,6 h acumuladas em excesso de amostragem, respetivamente. Uma análise dos lotes que foram processados com excesso de amostragem permitiu concluir que muitos destes lotes tinham sido processados na sua totalidade – 12 ou 25 *wafers*, dependendo do lote – quando os alvos de amostragem se encontravam entre uma e três *wafers*. Este processamento de todas as *wafers* dos lotes deveu-se à qualificação deste produto num equipamento de uma família diferente.

A qualificação serve para preparar o processamento em modo produtivo de um produto num equipamento, e é um processo extremamente rigoroso, dada a precisão exigida às operações realizadas. Esta situação sobrecarrega os equipamentos da família A porque implica um maior número de operações de medição. Para contornar esta causa de excesso de amostragem, os alvos de amostragem para as semanas em que ocorre a qualificação de certos produtos deviam ser alterados para o número de *wafers* a processar, normalmente, a totalidade do lote. No entanto, o planeamento de produção é feito com vários meses de antecedência, o que dificulta a previsão do momento em que vai existir a necessidade de qualificar produtos em máquinas diferentes.

Outra solução passa por procurar balancear o *release* – preparação do processamento de produtos - por equipamentos, para não sobrecarregar nenhuma área da linha produtiva, nomeadamente a família A. Esta solução corresponde, então, a planear uma melhor distribuição da utilização dos equipamentos na fase de *release* de produtos. Na semana w202118 ocorreu a qualificação do Prod#47, sendo o raciocínio idêntico ao acima apresentado.

Um fator que pode levar ao *Oversampling*, por a amostra não satisfazer os limites de tolerância definidos, é a ocorrência de *warpage*. A falha de um outro equipamento na linha, numa área diferente, pode levar à acumulação de *WIP* durante períodos de tempo consideráveis. Quanto mais tempo o material ficar parado à espera nas FOUPs para ser processado, maior é o *warpage* desenvolvido nas *wafers*. Esta é apenas uma das razões para aparecer *warpage*, sendo que existem outras razões associadas ao processo produtivo. Então, a falha de equipamentos a jusante na linha, leva a acumulação de *WIP*, que por sua vez produz *warpage*. O aparecimento deste defeito significa que a amostra vai falhar a medição e então as restantes *wafers* do lote terão de ser processadas, sendo contabilizadas como excesso de amostragem.

Outro motivo que pode explicar o tempo associado a *Oversampling* diz respeito à incorreta definição de *targets* de amostragem nos ficheiros utilizados na ferramenta. Uma vez que estes ficheiros são mantidos manualmente e estão sujeitos a pequenas alterações, pode passar algum tempo sem estas serem detetadas. Desta forma, existe a possibilidade de considerar na ferramenta o processamento de um certo número de *wafers* como excesso de amostragem quando na realidade está a ser processado o número correto de *wafers*. Uma situação como a referida foi detetada através da ferramenta, para um produto novo que pertencia a um conjunto de produtos existentes e com parâmetros definidos. A este produto foi automaticamente atribuído o alvo de amostragem de outro produto desse conjunto, quando, na realidade, deveria ter um *target* diferente. Ao analisar este produto na ferramenta, a situação foi identificada e corrigida, voltando a correr a ferramenta com os novos dados para deixar de atribuir excesso de amostragem. Esta é outra utilidade da ferramenta, verificar os parâmetros de planeamento.

Na Figura 28 é apresentado o Diagrama de Ishikawa com as principais causas encontradas para a acumulação de tempo a processar *wafers* acima do alvo de amostragem.

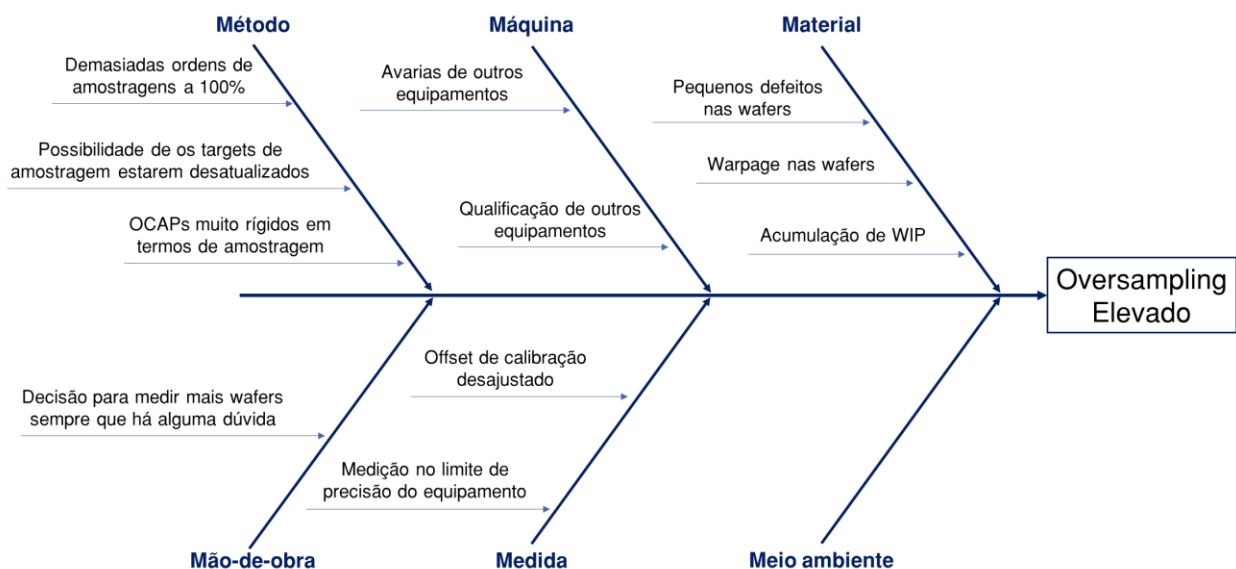


Figura 28 - Diagrama de Ishikawa para o Oversampling elevado⁷

⁷ Out of Control Action Plan (OCAP): Plano de ação para situações fora do normal funcionamento das máquinas.

Para resolver o problema *Oversampling* elevado, foi seguido o ciclo PDCA, introduzido na Secção 2.3.2, e a implementação foi a seguinte:

- *Plan*: identificar as causas para a acumulação de tempo em *Oversampling*, como descrito nos parágrafos anteriores; depois estabelecer um plano de ação – rever o procedimento no caso de a amostragem falhar.
- *Do*: implementar o novo procedimento para a falha das amostras: quando estas falham, chamar o engenheiro de Processo para averiguar se é uma falha marginal. Se for, não há necessidade de medir o resto do lote. Esta alteração foi introduzida na semana w202112.
- *Check*: a verificação dos resultados obtidos não foi imediata devido ao aparecimento de outros fatores que influenciaram substancialmente o *Oversampling*. Apenas nas semanas w202119 e w202120 foi possível analisar o *Oversampling* sem o ruído de outros fatores e o plano aparentava produzir efeitos positivos.
- *Act*: é necessária a verificação contínua do excesso de amostragem e caso o plano deixe de estar a surtir o efeito planeado, tem de se reiniciar o ciclo PDCA.

A utilização da ferramenta permitiu, identificar situações de excesso de amostragem e deste estudo surgiu um novo plano de ação para o caso de falhas marginais na amostragem. Desta forma, obtiveram-se resultados efetivos, ao diminuir o tempo associado a esta perda.

5.1.4 Rework - Wafer Reprocessing

A última categoria de perdas de disponibilidade de equipamentos a investigar é o *Rework*, mais concretamente, o *Wafer Reprocessing* dentro do *Rework*. Como referido, as perdas por *Rework* podem estar associadas ao reprocessamento de *wafers* ou à realização de *steps* de retrabalho. O retrabalho é realizado quando um outro *step* falha e obriga a repetir um conjunto de passos já realizados, pelo que, à partida, não se deve a operações realizadas pelo equipamento em estudo. Assim, será estudado o reprocessamento de *wafers*, ou seja, a repetição de *steps* numa *wafer* que não são definidos como retrabalho.

Começando por analisar a evolução do tempo acumulado a repetir *steps* ao longo das primeiras vinte semanas de 2021, para equipamentos da família A, como apresentado na Figura 29, verifica-se que existe consistentemente algum tempo acumulado semanalmente, acima de 15 h.

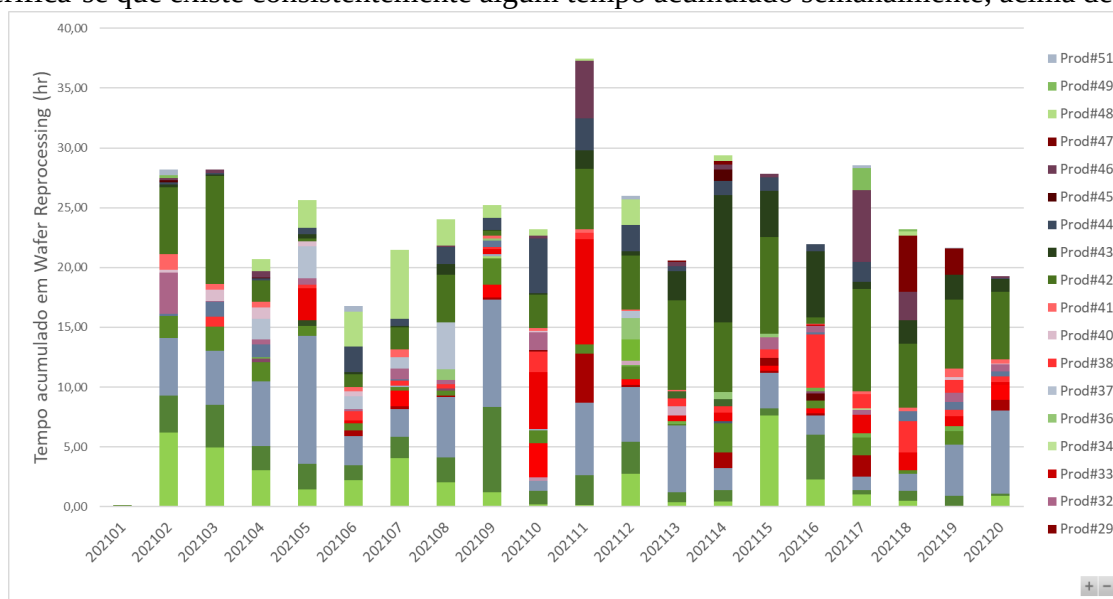


Figura 29 - Evolução do tempo acumulado em Wafer Reprocessing, em equipamentos da família A, ao longo das primeiras vinte semanas de 2021

É também possível identificar alguma variabilidade nesta perda, mas inferior a outros estados.

De seguida, analisou-se a tabela apresentada na Figura 30 para identificar os produtos e as semanas mais críticos em termos de tempo acumulado a repetir *steps*. Ao analisar a Figura 30 verifica-se, salvo algumas exceções, uma distribuição mais homogênea do tempo semanal a reprocessar *steps* em cada produto. Os picos de tempo acumulados a repetir *steps* devem-se a causas que foram investigadas individualmente e concluiu-se que estas se deviam a problemas pontuais e que foram devidamente endereçados.

Week	Prod#42	Prod#03	Prod#01	Prod#02	Prod#43	Prod#19	Prod#44	Prod#08	Prod#48	Prod#46	Prod#21	Prod#37	Prod#32	Prod#05	Prod#07	Prod#47	Prod#41	Prod#28
202101	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202102	5,60	4,85	6,18	3,08	0,21	0,00	0,22	1,84	0,00	0,23	0,00	0,00	3,40	0,00	0,00	0,00	1,30	0,20
202103	9,06	4,51	4,93	3,59	0,11	0,00	0,11	2,02	0,00	0,31	0,84	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,48	1,25
202104	1,77	5,36	3,03	2,06	0,00	0,00	0,17	1,62	0,99	0,53	0,00	1,71	0,42	0,00	0,00	0,00	0,49	1,07
202105	0,23	10,70	1,42	2,16	0,35	2,68	0,54	0,83	2,34	0,00	0,31	2,70	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202106	1,07	2,43	2,22	1,23	0,15	0,25	2,16	0,58	2,93	0,00	0,81	1,08	0,17	0,48	0,00	0,00	0,37	0,00
202107	1,78	2,31	4,08	1,78	0,15	0,00	0,60	0,30	5,77	0,00	0,42	0,94	0,91	0,20	1,35	0,00	0,67	0,10
202108	3,98	5,06	2,03	2,09	0,90	0,00	1,38	0,46	2,17	0,16	0,40	3,94	0,34	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
202109	0,39	8,94	1,22	7,14	0,08	0,46	1,02	2,22	1,03	0,00	0,14	0,00	0,00	0,17	1,10	0,00	0,25	0,55
202110	2,76	0,82	0,22	1,13	0,11	4,77	4,62	1,06	0,49	0,24	1,71	0,00	1,47	0,00	2,85	0,00	0,27	0,00
202111	5,05	6,09	0,12	2,49	1,54	8,77	2,68	0,78	0,15	4,84	0,56	0,00	0,00	4,10	0,00	0,00	0,26	0,00
202112	4,52	4,62	2,76	2,64	0,33	0,00	2,18	1,10	2,19	0,00	0,00	0,60	0,00	0,19	0,42	0,00	0,12	0,00
202113	7,48	5,53	0,38	0,86	2,46	0,49	0,41	0,16	0,00	0,32	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,14	0,00
202114	5,83	1,84	0,45	0,96	10,62	0,68	1,20	2,42	0,49	0,46	0,58	0,00	0,00	1,31	0,00	0,26	0,00	0,00
202115	8,13	2,97	7,65	0,56	3,84	0,00	1,13	0,00	0,00	0,28	0,70	0,00	1,04	0,17	0,45	0,00	0,00	0,00
202116	0,56	1,57	2,26	3,79	5,52	0,00	0,60	0,65	0,00	0,00	4,48	0,00	0,51	0,21	0,40	0,00	0,07	0,18
202117	8,57	1,14	1,05	0,34	0,55	1,58	1,67	1,51	0,00	6,05	0,00	0,00	0,36	1,76	0,00	0,00	0,26	0,00
202118	5,39	1,44	0,50	0,82	1,90	1,48	0,00	0,31	0,40	2,42	2,58	0,00	0,00	0,00	0,00	4,67	0,30	0,83
202119	5,79	4,23	0,00	0,94	2,04	0,84	0,00	1,14	0,00	0,00	0,57	0,00	0,77	0,00	0,00	2,20	0,69	0,65
202120	5,65	6,94	0,92	0,19	1,06	0,23	0,10	0,00	0,00	0,16	0,48	0,00	0,60	0,88	1,23	0,00	0,35	0,42
Grand Total	83,62	81,38	41,43	37,85	31,93	22,23	20,79	19,15	18,95	15,99	15,20	10,98	10,57	9,55	7,80	7,26	6,01	5,26

Figura 30 – Representação de parte da tabela com a distribuição do número de horas acumuladas em Wafer Reprocessing, por produto e por semana, para equipamentos da família A

Na Figura 31 é apresentada a Análise de Pareto realizada para identificar os produtos com maior influência no tempo acumulado nesta categoria de perdas. Nesta análise foram identificados dez produtos como responsáveis por cerca de 80% do tempo total acumulado neste estado, para a família A. Deste conjunto, dois produtos – o Prod#42 e o Prod#03 – destacam-se por terem mais de 80 h acumuladas a repetir *steps*, sendo que o terceiro produto com mais tempo acumulado tem apenas 41 h acumuladas. Esta disparidade justifica o foco da análise do reprocessamento de *wafers* somente nos produtos Prod#42 e Prod#03.

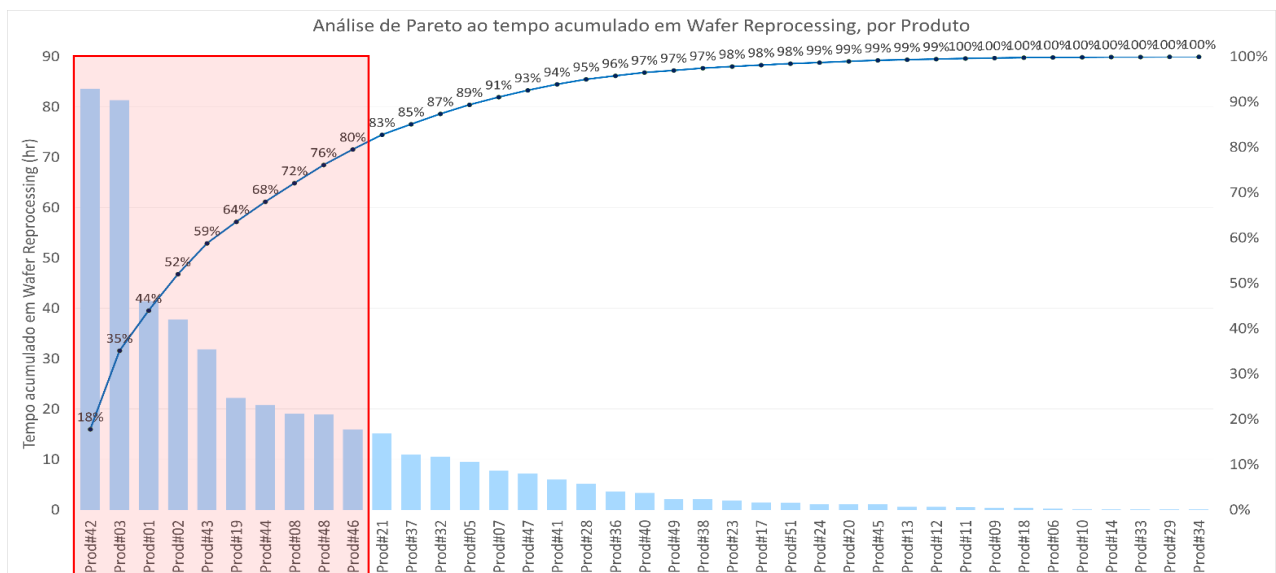


Figura 31 - Análise de Pareto ao tempo acumulado em Wafer Reprocessing por produto, num conjunto de equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021

Para estes dois produtos, foi realizado um estudo dos *steps* em que ocorre o maior número de reprocessamentos, e de seguida foi estudado número de reprocessamentos em cada máquina.

A partir dos gráficos resultantes destas análises, disponíveis no Anexo E, é possível concluir:

- Para o Prod#03, os *steps* mais críticos, de acordo com a Figura E-1, tanto em termos de número absoluto de reproprocessamentos, como em termos de proporção, são o Step#08, Step#26 e o Step#32. Analisando a Figura E-2, no Step#08 não é possível estabelecer uma comparação entre os equipamentos. No Step#26 verificou-se 8,5% de reproprocessamentos no Equip#A03 e 9,6% no Equip#A04, pelo que não há diferenças significativas. Relativamente ao Step#32, no Equip#A03 o nível de reproprocessamentos foi de 11,2%, enquanto no Equip#A04 foi de apenas 4,3%, logo, verificou-se uma quantidade de reproprocessamentos consideravelmente superior no Equip#03, no Step#32;
- Para o Prod#42, da análise da Figura E-3, o *step* mais crítico é, de forma evidente, o Step#32, com maior número absoluto de reproprocessamentos, maior proporção de reproprocessamentos – cerca de 12,2% - e maior número de *wafers* processadas. Da análise da Figura E-4, verifica-se que neste produto o Equip#04 é o com maior nível de reproprocessamento, na ordem dos 16,2%, quando no Equip#03 é de apenas 7,5%.

Com esta análise foi possível estabelecer que é necessário analisar o processamento do Step#08, Step#26 e Step#32, em especial quando associados ao Prod#03 e o Step#32 no Produto#42.

Como os produtos Prod#01, Prod#02 e Prod#03 são da mesma família, e pertencem ao top 4 com maiores perdas, foi realizada uma Análise 5 Why, seguindo a metodologia apresentada na Secção 2.3.1, para identificar a causa para o elevado tempo acumulado em *Wafer Reprocessing*. A Figura 32 apresenta o esquema desta análise, e permite concluir que a principal causa para o excesso de reproprocessamentos nestes produtos prende-se com o facto de serem tratados como iguais, por serem da mesma família, apesar de terem características diferentes. Uma solução para este caso passa por considerar como três produtos totalmente independentes. Esta solução não foi imediatamente implementada uma vez que aumentaria a complexidade do planeamento da produção e da gestão da produção na linha. É necessário, então, realizar uma análise cuidada para considerar os benefícios e prejuízos desta alteração, assim como procurar outras soluções.

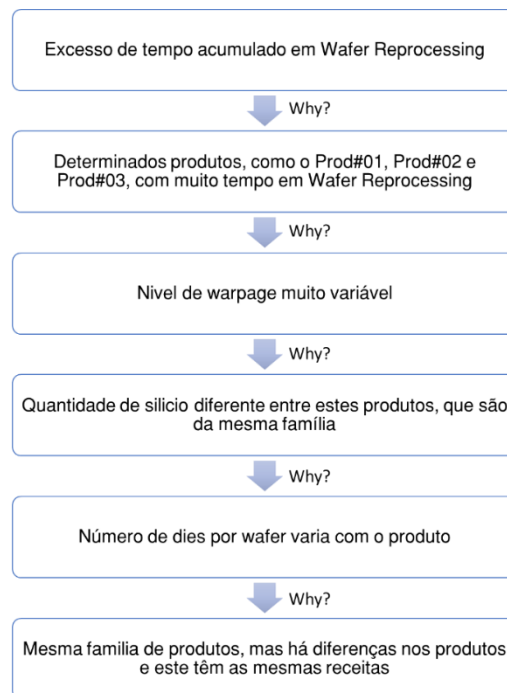


Figura 32 - Análise 5 Why ao excesso de tempo acumulado a reprocessar wafers, em equipamentos da família A

Esta categoria de perdas, que tem uma relevância considerável, era algo que não era possível identificar antes da introdução da ferramenta desenvolvida.

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

O projeto apresentado no presente relatório visou a idealização conceptual, desenvolvimento integral e implementação de uma ferramenta de monitorização de equipamentos numa empresa na indústria de semicondutores, assim como a utilização da ferramenta desenvolvida para identificar oportunidades de melhoria e dar resposta a algumas destas.

A ferramenta foi desenvolvida para um conjunto de equipamentos na área de metrologia, que tinham sido identificados como processos gargalo na fábrica. A aplicabilidade da ferramenta foi testada para outros conjuntos de equipamentos, tendo sido validada a sua transversalidade, dentro de certas limitações, associadas a especificidades dos próprios equipamentos. Todo o desenvolvimento da ferramenta, desde o próprio funcionamento da mesma, à interface com o utilizador e aos diferentes gráficos e relatórios apresentados, foi materializado durante o presente projeto, criando de raiz uma ferramenta em EXCEL, funcional e com utilidade prática. Os objetivos iniciais para o projeto foram cumpridos nos prazos estipulados, tendo sido implementadas funcionalidades suplementares às inicialmente previstas.

A capacidade produtiva dos equipamentos passou a estar descrita com um grau de detalhe superior, permitindo extrair mais informações e compreender melhor que tipo de operações é que uma máquina está efetivamente a realizar. O tempo que era associado a produtivo passou a estar repartido em diversos subestados – produtivo (real), produtivo com processamento de todo o lote, processamento em excesso de amostragem, processamento acima do tempo de cadência alvo, reproprocessamento e falha de processamento de *wafers*, TBL, TBW, processamento de *wafers* não produtivos (de engenharia), entre outros. Esta caracterização permite uma análise mais cuidada e rigorosa do funcionamento dos equipamentos, assim como a identificação de ineficiências que vão surgindo e que não seriam detetadas, e melhorou a qualidade da informação relativa à capacidade produtiva dos equipamentos.

Na fase final do projeto, a ferramenta estava a ser utilizada para analisar a *performance* de vários equipamentos, permitindo não só identificar oportunidades de melhoria como também apresentar informação a um nível que facilita a identificação das causas para as quebras de *performance*. A utilidade da ferramenta foi comprovada quando outros departamentos pediram para a ferramenta ser disponibilizada para eles próprios a utilizarem, isto depois de terem visto os resultados apresentados pela mesma.

A Amkor tem definidas diversas metas para a estratégia a longo prazo, algumas das quais relacionadas com sustentabilidade e meio ambiente. Pretende-se fazer uma melhor gestão dos recursos, em particular dos naturais, consumidos no processo produtivo, de forma a reduzir o impacto ambiental. Dentro deste tema, a identificação e correção de ineficiências, como reproprocessamentos, falhas de processamento e excesso de amostragem, permite reduzir os recursos consumidos. Este assunto tem interesse em ser desenvolvido, pelo que uma proposta para trabalho futuro é realizar um estudo da redução de consumo de energia e de água, quando

a ferramenta estiver a ser aplicada para todos, ou quase todos, os equipamentos. Também seria interessante estudar o impacto obtido na redução de consumo de recursos materiais e financeiros.

Uma das principais limitações desta ferramenta prende-se com a sua aplicação para equipamentos que não disponibilizam o mesmo tipo de informação a nível de transações. Em alguns equipamentos, a informação ao nível de transações não é tão detalhada, pelo que é necessário realizar algumas simplificações – considerar *process setup* como *start* e *data upload* como *complete* – para utilizar a ferramenta. Esta situação aponta como sugestão de trabalho futuro um estudo da resolução desta questão, em termos de impactos da correção introduzida e da análise da possibilidade de obter um maior nível de informação nas transações de todos os equipamentos a monitorizar. O objetivo é obter um tempo produtivo mais próximo do real e ainda voltar a introduzir o estudo do *Speed Loss* nestas situações.

Ainda que a ferramenta esteja operacional e a ser utilizada, no momento em que este relatório foi terminado estavam em curso projetos para elevar as capacidades da ferramenta e melhorar os resultados obtidos pela mesma.

Uma proposta de trabalho futuro que já começou a ser idealizada e, em parte, implementada para teste, é a de uma funcionalidade que permita calcular o RTT de um *step*, para um produto, com base nos dados históricos desse produto. Esta funcionalidade tem dois objetivos: rever o RTT de um *step* de um produto existente e estimar o RTT dos *steps* de um novo produto, similar a um produto – ou a um conjunto de produtos – existente(s). Neste momento, a ferramenta permite calcular uma estimativa do RTT através da média ponderada dos RTTs medidos num *step* de um produto, atribuindo diferentes pesos relativos a meses diferentes e a equipamentos diferentes. Pode ter interesse dar maior peso ao RTT medido nos meses mais recentes e menor peso aos meses mais distantes. Também pode ter sido identificado em um ou mais equipamentos um processamento diferente, que pode ser tido em conta com ponderações diferentes por equipamento. Ainda é necessário validar os resultados obtidos e rever os objetivos para esta funcionalidade como, por exemplo, realizar uma estimativa consoante o número de *dies* da *wafers*, da dimensão da mesma, ou por outras categorias. Este último nível de configuração não está implementado, mas é algo que tem interesse investigar de futuro, partindo das funcionalidades existentes. A funcionalidade de estimativa do RTT encontra-se detalhada no Anexo F.

Para finalizar, outra proposta para trabalho a desenvolver no futuro é a de repensar o cruzamento de dados com os dados do CERBERUS. Na fase final da ferramenta, esta alocação é realizada do modo descrito na Secção 4.4.2. Uma sugestão é considerar atribuir todo o tempo, identificado pela ferramenta, que a máquina esteve parada ou com falha de processamento, ao estado que esteja selecionado no CERBERUS para a máquina, desde este que não seja produtivo. Esta interpretação dos dados do CERBERUS encontra-se desenvolvida e implementada, e está disponível no Anexo G para consulta. Falta realizar uma análise mais cuidada das vantagens e desvantagens de cada uma destas opções e da validação do interesse prático dos resultados de cada um dos modos de funcionamento da ferramenta, para decidir qual utilizar. Ainda relacionado com este assunto, seria de interesse estudar a hipótese de procurar mais do que um estado do CERBERUS nos momentos em que ocorre TBL ou *Failed Processing*. Será sempre necessário realizar um balanço dos proveitos retirados com o aumento do detalhe na informação, e do aumento da complexidade da ferramenta necessário para acomodar estas alterações.

Referências

- A. Faria, José (FEUP). 2020. "Quality Management Part 1: Fundamentals of Quality Management." FEUP.
- Amkor Technology. 2017. "Amkor Technology to Acquire NANIUM." 2017. <https://ir.amkor.com/news-releases/news-release-details/amkor-technology-acquire-nanium>.
- . 2021a. "Amkor Overview." 2021. <https://amkor.com/amkor-overview/>.
- . 2021b. "Careers – Portugal." 2021. <https://amkor.com/careers/portugal/>.
- Benjamin, Samuel Jebaraj, M. Srikamaladevi Marathamuthu, and Uthiyakumar Murugaiah. 2015. "The Use of 5-WHYs Technique to Eliminate OEE's Speed Loss in a Manufacturing Firm." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 21 (4): 419–35. <https://doi.org/10.1108/JQME-09-2013-0062>.
- Carlile, Brad, and Business Systems Division. 1996. "Data Warehousing on the Cray CS6400 : Oracle 's Test-to-Scale Benchmark," 123–29.
- Cheah, Chew Keat, Joshua Prakash, and Kok Seng Ong. 2020. "An Integrated OEE Framework for Structured Productivity Improvement in a Semiconductor Manufacturing Facility." *International Journal of Productivity and Performance Management* 69 (5): 1081–1105. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-04-2019-0176>.
- Chen, Ming Syan, Jiawei Han, and Philip S. Yu. 1996. "Data Mining: An Overview from a Database Perspective." *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 8 (6): 866–83. <https://doi.org/10.1109/69.553155>.
- Chien, Chen Fu, Runliang Dou, and Wenhan Fu. 2018. "Strategic Capacity Planning for Smart Production: Decision Modeling under Demand Uncertainty." *Applied Soft Computing Journal* 68: 900–909. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.001>.
- Corinne Johnson. 2016. "The Benefits of PDCA." *Quality Progress*.
- Elmaraghy, Hoda, Ahmed M Deif, Intelligent Manufacturing Systems, and Service Engineering Program. 2014. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7>.
- Espadinha-Cruz, Pedro, Radu Godina, and Eduardo M.G. Rodrigues. 2021. "A Review of Data Mining Applications in Semiconductor Manufacturing." *Processes* 9 (2): 1–38. <https://doi.org/10.3390/pr9020305>.
- Foster, Jason, John Matthews, Preston Beaumont, Thomas Zarbock, and Danny Yeo. 2008. "Equipment Throughput Optimization by Means of Speed Loss Analysis." *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 21 (3): 371–75.

<https://doi.org/10.1109/TSM.2008.2001212>.

- Gotoh, Fumio. 1999. *Autonomous Maintenance in Seven Steps: Implementing TPM on the Shop Floor*. Florida: Taylor & Francis Group, LLC.
- Harrington, H. James, and Voehl Frank. 2016. *The Innovation Tools Handbook, Volume 2: Evolutionary and Improvement Tools That Every Innovator Must Know*. Edited by CRC Press. CRC Press.
- Hitachi High-Tech. n.d. "Semiconductor Glossary." Accessed May 18, 2021a. <https://www.hitachi-hightech.com/global/products/device/semiconductor>.
- . n.d. "Semiconductor Room': 5. Integrated Circuit (IC)." Accessed May 18, 2021b. <https://www.hitachi-hightech.com/global/products/device/semiconductor/ic.html>.
- Infineon. 2021. "Infineon - A World Leader in Semiconductor Solutions." 2021. <https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/company/>.
- Inoguchi, Toshio. 1974. *Semiconductor Physics and Semiconductor Devices. The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan*. Vol. 28. <https://doi.org/10.3169/itej1954.28.723>.
- Khakifirooz, Marzieh, Chen Fu Chien, and Ying Jen Chen. 2018. "Bayesian Inference for Mining Semiconductor Manufacturing Big Data for Yield Enhancement and Smart Production to Empower Industry 4.0." *Applied Soft Computing Journal* 68: 990–99. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.11.034>.
- Leitão, Armando (FEUP), Bernardo (FEUP) Almada-Lobo, and Luís (FEUP) Guimarães. 2019. "TPM - Total Productive Maintenance."
- Ma, Lei, Nana Zhang, and Zhongqiu Zhang. 2018. "Tool Efficiency Analysis Model Research in SEMI Industry." *E3S Web of Conferences* 38: 1–5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183802027>.
- Meyer, T., G. Ofner, S. Bradl, M. Brunnbauer, and R. Hagen. 2008. "Embedded Wafer Level Ball Grid Array (EWLB)." *10th Electronics Packaging Technology Conference, EPTC 2008*, no. January 2009: 994–98. <https://doi.org/10.1109/EPTC.2008.4763559>.
- Nemeth, M., and G. Michalconok. 2017. "The Initial Analysis of Failures Emerging in Production Process for Further Data Mining Analysis." *Proceedings of the 2017 21st International Conference on Process Control, PC 2017*, 210–15. <https://doi.org/10.1109/PC.2017.7976215>.
- Nestle, Mark (Praxair Inc.). 2013. "Gemba Is Gold." ASQ's Lean Enterprise Division.
- Pomorski, Thomas. n.d. "Major Revision Update for SEMI E10 Specification for Definition and Measurement of Equipment Reliability, Availability, and Maintainability (RAM)." Accessed April 20, 2021. https://www.semi.org/en/Standards/CTR_031244#P6_2689.
- Prasetyo, Yogi Tri, and Felix Concepcion Veroya. 2020. "An Application of Overall Equipment Effectiveness (OEE) for Minimizing the Bottleneck Process in Semiconductor Industry." *2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2020*, no. May: 345–49. <https://doi.org/10.1109/ICIEA49774.2020.9101925>.
- Rimini, Emanuele (Catania University). 1995. *Ion Implantation: Basics to Device Fabrication*. Springer Science+Business Media, LLC.
- Sanders, Adam, Chola Elangeswaran, and Jens Wulfsberg. 2016. "Industry 4 . 0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4 . 0 Function as Enablers for Lean Manufacturing" 9 (3): 811–33.
- SME, SCRC (NC State University). 2019. "Capacity Planning." Supply Chain Resource Cooperative. 2019. <https://scm.ncsu.edu/scm-articles/article/capacity-planning>.

- Soković, Mirko, Jelena Jovanović, Zdravko Krivokapić, and Aleksandar Vujović. 2009. "Basic Quality Tools in Continuous Improvement Process." *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering* 55 (5): 1–9.
- Tayal, Ashwani, Nirmal Singh Kalsi, Munish Kumar Gupta, Danil Yurievich Pimenov, Murat Sarikaya, and Catalin I. Pruncu. 2021. "Effectiveness Improvement in Manufacturing Industry; Trilogy Study and Open Innovation Dynamics." *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 7 (1): 1–21. <https://doi.org/10.3390/joitmc7010007>.
- Tayal, Ashwani, and Nirmal Singh Kalsi. 2020. "Review on Effectiveness Improvement by Application of the Lean Tool in an Industry." *Materials Today: Proceedings* 43: 1983–91. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.431>.
- Varas, By Antonio, Raj Varadarajan, Jimmy Goodrich, and Falan Yinug. 2020. "Government Incentives and US Competitiveness in Semiconductor Manufacturing," no. September.
- Wang, Li Chih, Pei Chun Chu, and Si Yi Lin. 2019. "Impact of Capacity Fluctuation on Throughput Performance for Semiconductor Wafer Fabrication." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 55 (January 2018): 208–16. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.03.005>.
- Zhang, Fan, Jie Song, Yingzhuo Dai, and Jie Xu. 2020. "Semiconductor Wafer Fabrication Production Planning Using Multi-Fidelity Simulation Optimisation." *International Journal of Production Research* 58 (21): 6585–6600. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1683252>.

Anexo A: Diagramas de apoio

Tabela A-1 - Principais transações e equipamentos que as suportam

Transação	DESCRIÇÃO	Equipamentos (Famílias)
<i>Start</i>	Transação associada ao início do processamento de uma <i>wafer</i> num equipamento. Apenas as <i>wafers</i> que são processadas têm esta transação. Transação lançada automaticamente pelo equipamento.	A, B, C, D
<i>Complete</i>	Transação associada à conclusão do processamento de uma <i>wafer</i> num equipamento. Apenas as <i>wafers</i> que são processadas têm esta transação. Transação lançada automaticamente pelo equipamento.	A, B, C, D
<i>Process setup</i>	Transação associada ao <i>setup</i> das <i>wafers</i> de um lote quando este é colocado no equipamento. Todas as <i>wafers</i> do lote têm esta transação. Transação lançada automaticamente pelo equipamento.	A, B, C, D
<i>Data Upload</i>	Transação associada ao envio das informações do processamento da <i>wafer</i> para o sistema. Esta transação pode ser lançada automaticamente pelo equipamento ou manualmente pelo operador.	A, B, C, D

Tabela A-2 - Quadro resumo com os estados dos equipamentos

COR	NOME (SIGLA)	DESCRIÇÃO	ORIGEM DOS DADOS
	Scheduled Downtime (SD)	Tempo definido no <i>software</i> de monitorização como paragens programadas (como por exemplo, manutenção).	Cerberus
	Unscheduled Downtime (UD)	Tempo definido no <i>software</i> de monitorização como paragens não programadas (como por exemplo, ações de manutenção não planeadas).	Cerberus
	Engineeirng	Tempo definido no <i>software</i> de monitorização para atividades de engenharia, ou tempo de processamento de <i>wafers</i> definidas como produtos de engenharia.	Cerberus + Ferramenta
	Time Between Wafers (TBW)	Tempo entre a transação de <i>complete</i> de uma <i>wafer</i> e a transação de <i>start</i> da <i>wafer</i> imediatamente a seguir, dentro do mesmo lote e no mesmo equipamento.	Ferramenta
	Time Between Lots (TBL)	Tempo entre a transação de <i>complete</i> da última <i>wafer</i> a ser processada num lote e a transação de <i>start</i> da primeira <i>wafer</i> do lote seguinte, no mesmo equipamento.	Ferramenta
	Stand By (SB)	Tempo definido no <i>software</i> de monitorização como paragem em espera, que se pode dever a falta de operador, falta de receita ou falta de material para começar a trabalhar.	Cerberus
	Unplanned	Tempo em que o equipamento está a processar <i>wafers</i> de produtos que não faziam parte do plano de produção definido pelo Departamento de Capacidade.	Ferramenta
	Oversampling	Tempo em que o equipamento está a processar um número de <i>wafers</i> , de um determinado lote, superior ao número de <i>wafers</i> projetado como alvo de amostragem.	Ferramenta
	Speed Loss	Tempo de processamento de <i>wafers</i> acima do alvo para um determinado <i>step</i> , produto e para a semana em questão.	Ferramenta
	Wafer Reprocessing	Tempo de processamento de uma <i>wafer</i> que realiza o <i>step</i> em causa mais do que uma vez. A última vez que realiza o <i>step</i> é definida como produtiva e as restantes como reprocessamentos.	Ferramenta
	Failed Processing	Tempo em que o processamento é diferente do normal e correto. Por exemplo, quando uma <i>wafer</i> tem uma transação de <i>complete</i> sem ter tido <i>start</i> , ou <i>start</i> sem depois ter <i>complete</i> .	Ferramenta
	Rework	Tempo em que o equipamento está a processar <i>wafers</i> em <i>steps</i> previamente definidos como <i>steps</i> retrabalho e que fazem parte do conjunto de <i>steps</i> pelo qual a <i>wafer</i> irá ter de passar.	Ferramenta
	Productive 100%	Tempo em que o equipamento está a processar um número de <i>wafers</i> igual ao tamanho do lote, ou seja, processa todo o lote num determinado <i>step</i> .	Ferramenta
	Productive	Tempo de processamento de <i>wafers</i> de produtos produtivos, funcionando de acordo com o que foi projetado, dentro dos alvos de cadência e de amostragem e sem repetição de <i>steps</i> .	Ferramenta

Desenvolvimento de uma ferramenta de análise da capacidade produtiva numa Indústria de Semicondutores

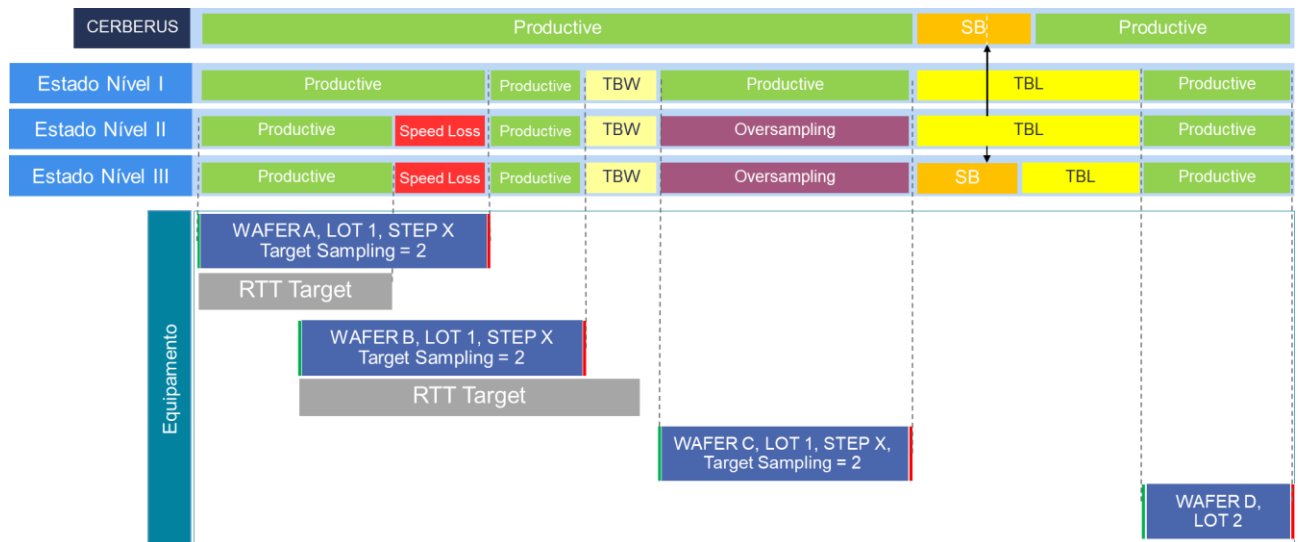


Figura A-1- Atribuição do estado nos três níveis da ferramenta

Tabela A-3 - Tabela representativa da utilizada no ficheiro de análise, adaptada e com os dados para uma hora de funcionamento da família A

Wafer	Lot	Step	Equipment	Operation	Date	RTT	TBW	TBL	Time	Stand	begg	time	Nickname	RTT Tar	Speed	SpeedW	RTT - Ta	Target s	wfs/lot	Oversam	Undersa	Lot size	week	time	Status	Flag	
Wafer#008	Lot#003	Step#14	Equip#A02	StartMaterial	21/04/2021 03:03			2,10					Prod#46										202117	0,00	TBL	1	
Wafer#008	Lot#003	Step#14	Equip#A02	CompleteMaterial	21/04/2021 03:11	8,20							Prod#46	9	0,00	0,80	-0,01	3	3				12	202117	8,20	Productive	1
Wafer#007	Lot#003	Step#14	Equip#A02	StartMaterial	21/04/2021 03:04		0,00						Prod#46										202117	0,00	Productive	1	
Wafer#007	Lot#003	Step#14	Equip#A02	CompleteMaterial	21/04/2021 03:19	7,63							Prod#46	9	0,00	1,37	-0,02	3	3				12	202117	7,63	Productive	1
Wafer#006	Lot#003	Step#14	Equip#A02	StartMaterial	21/04/2021 03:12		0,00						Prod#46										202117	0,00	Productive	1	
Wafer#006	Lot#003	Step#01	Equip#A02	CompleteMaterial	21/04/2021 03:27	7,63							Prod#21	9	0,00	1,37	-0,02	3	3				12	202117	7,63	Productive	1
Wafer#001	Lot#009	Step#30	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:46		0,75						Prod#08										202117	0,00	TBL	1	
Wafer#028	Lot#002	Step#29	Equip#A03	CompleteMaterial	21/04/2021 03:05	7,47							Prod#43	7	0,47	0,00	0,01	2	2				12	202117	7,00	Productive	1
Wafer#017	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:09			4,28					Prod#43										202117	0,00	TBL	1	
Wafer#016	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:16		0,02						Prod#43										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#015	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:22		0,02						Prod#43										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#014	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:29		0,02						Prod#43										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#013	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:35		0,02						Prod#43										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#012	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:41		0,02						Prod#43										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#011	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:47		0,02						Prod#43										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#010	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:53		0,02						Prod#43										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#009	Lot#006	Step#30	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:59		0,02						Prod#08										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#027	Lot#001	Step#32	Equip#A04	CompleteMaterial	21/04/2021 03:03	7,95							Prod#03	7	0,95	0,00	0,02	2	2				12	202117	7,00	Productive	1
Wafer#026	Lot#007	Step#32	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:09			6,60					Prod#03										202117	0,00	TBL	1	
Wafer#026	Lot#007	Step#32	Equip#A04	CompleteMaterial	21/04/2021 03:16	6,80							Prod#03	6	0,80	0,00	0,01	3	3				12	202117	6,00	Productive	1
Wafer#025	Lot#007	Step#32	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:16		0,02						Prod#03										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#025	Lot#007	Step#32	Equip#A04	CompleteMaterial	21/04/2021 03:23	7,02							Prod#03	6	1,02	0,00	0,02	3	3				12	202117	6,00	Productive	1
Wafer#024	Lot#007	Step#32	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:23		0,00						Prod#03										202117	0,00	Productive	1	
Wafer#024	Lot#007	Step#08	Equip#A04	CompleteMaterial	21/04/2021 03:32	8,50							Prod#17	6	2,50	0,00	0,04	3	3				12	202117	6,00	Productive	1
Wafer#002	Lot#010	Step#08	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:34			2,55					Prod#17										202117	0,00	TBL	1	
Wafer#003	Lot#010	Step#08	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:39		0,03						Prod#17										202117	0,03	TBW	1	
Wafer#004	Lot#010	Step#08	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:45		0,02						Prod#17										202117	0,02	TBW	1	
Wafer#029	Lot#008	Step#16	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:52			1,80					Prod#01										202117	0,00	TBL	1	
Wafer#018	Lot#004	Step#11	Equip#A02	CompleteMaterial	21/04/2021 03:58	7,63							Prod#11	7	0,63	0,00	0,01	1	12	11			12	202117	0,00	Oversampling	2
Wafer#008	Lot#003	Step#14	Equip#A02	StartMaterial	21/04/2021 03:03			2,10					Prod#46										202117	2,10	SB	2	
Wafer#008	Lot#003	Step#14	Equip#A02	CompleteMaterial	21/04/2021 03:11	8,20							Prod#46	9	0,00	0,80	-0,01	3	3				12	202117	0,00	Productive	2
Wafer#007	Lot#003	Step#14	Equip#A02	StartMaterial	21/04/2021 03:04		0,00						Prod#46										202117	0,00	Productive	2	
Wafer#007	Lot#003	Step#14	Equip#A02	CompleteMaterial	21/04/2021 03:19	7,63							Prod#46	9	0,00	1,37	-0,02	3	3				12	202117	0,00	Productive	2
Wafer#006	Lot#003	Step#01	Equip#A02	StartMaterial	21/04/2021 03:12		0,00						Prod#21										202117	0,00	Productive	2	
Wafer#006	Lot#003	Step#30	Equip#A03	CompleteMaterial	21/04/2021 03:27	7,63							Prod#08	9	0,00	1,37	-0,02	3	3				12	202117	0,00	Productive	2
Wafer#001	Lot#009	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:46		0,75						Prod#43										202117	0,75	SB	2	
Wafer#028	Lot#002	Step#29	Equip#A03	CompleteMaterial	21/04/2021 03:05	7,47							Prod#43	7	0,47	0,00	0,01	2	2				12	202117	0,47	Speed Loss	2
Wafer#017	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:09			4,28					Prod#43										202117	4,28	TBL	2	
Wafer#016	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:16		0,02						Prod#43										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#015	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:22		0,02						Prod#43										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#014	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:29		0,02						Prod#43										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#013	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:35		0,02						Prod#43										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#012	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:41		0,02						Prod#43										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#011	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:47		0,02						Prod#43										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#010	Lot#006	Step#29	Equip#A03	StartMaterial	21/04/2021 03:53		0,02						Prod#43										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#009	Lot#006	Step#32	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:59		0,02						Prod#03										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#027	Lot#001	Step#32	Equip#A04	CompleteMaterial	21/04/2021 03:03	7,95							Prod#03	7	0,95	0,00	0,02	2	2				12	202117	0,95	Speed Loss	2
Wafer#026	Lot#007	Step#32	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:09			6,60					Prod#03										202117	6,60	TBL	2	
Wafer#026	Lot#007	Step#32	Equip#A04	CompleteMaterial	21/04/2021 03:16	6,80							Prod#03	6	0,80	0,00	0,01	3	3				12	202117	0,80	Speed Loss	2
Wafer#025	Lot#007	Step#32	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:16		0,02						Prod#03										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#025	Lot#007	Step#32	Equip#A04	CompleteMaterial	21/04/2021 03:23	7,02							Prod#03	6	1,02	0,00	0,02	3	3				12	202117	1,02	Speed Loss	2
Wafer#024	Lot#007	Step#08	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:23		0,00						Prod#17										202117	0,00	Productive	2	
Wafer#024	Lot#007	Step#08	Equip#A04	CompleteMaterial	21/04/2021 03:32	8,50							Prod#17	6	2,50	0,00	0,04	3	3				12	202117	2,50	Speed Loss	2
Wafer#002	Lot#010	Step#08	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:34			2,55					Prod#17										202117	2,55	TBL	2	
Wafer#003	Lot#010	Step#08	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:39		0,03						Prod#17										202117	0,00	TBW	2	
Wafer#004	Lot#010	Step#16	Equip#A04	StartMaterial	21/04/2021 03:45		0,02						Prod#01										202117	0,00	TBW	2	

Anexo B: Visão geral das famílias de equipamentos B, C e D

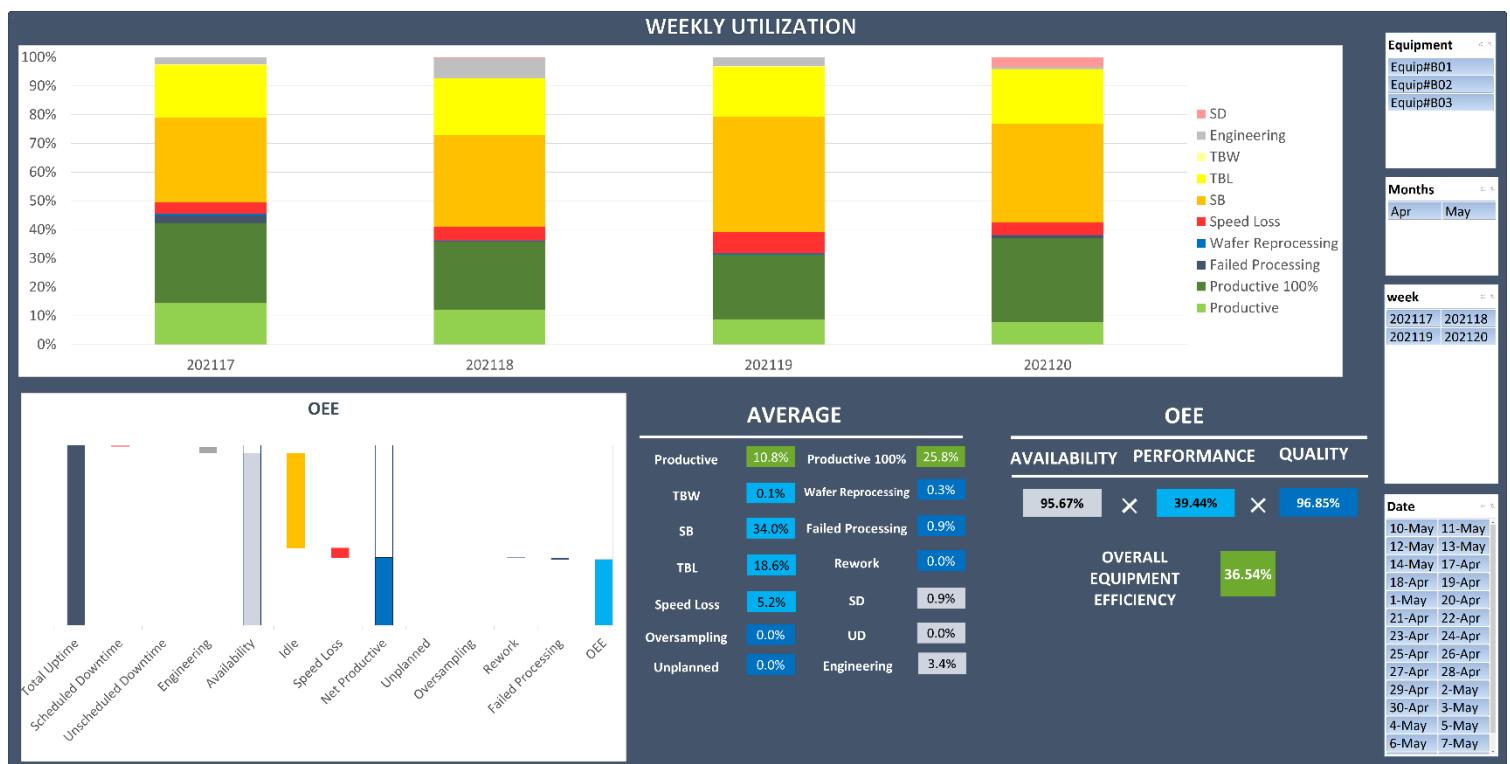


Figura B-1- Visão geral de alguns equipamentos da família B, entre as semanas w202117 e w202120

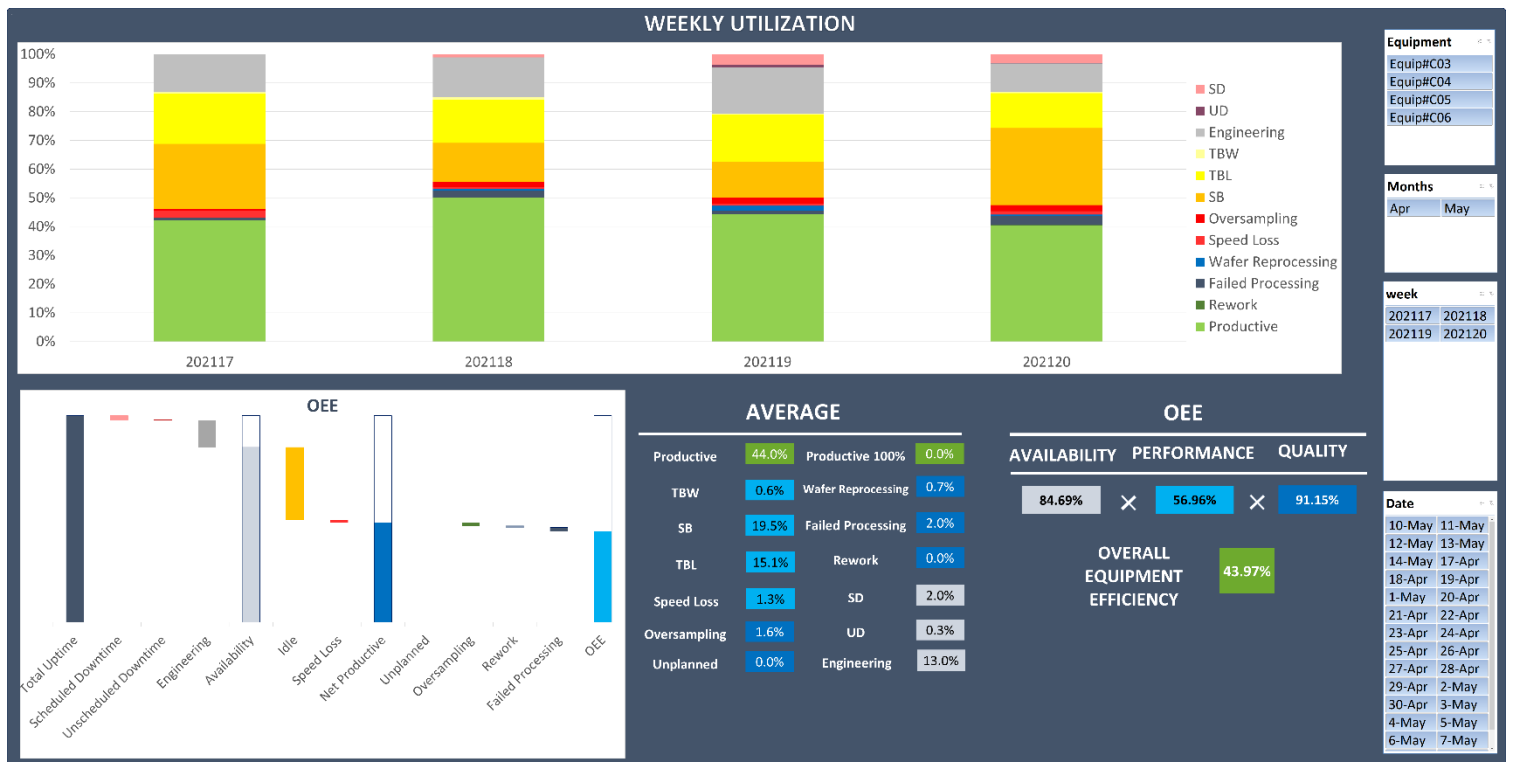


Figura B-2 - Visão geral de alguns equipamentos da família C, entre as semanas w202117 e w202120

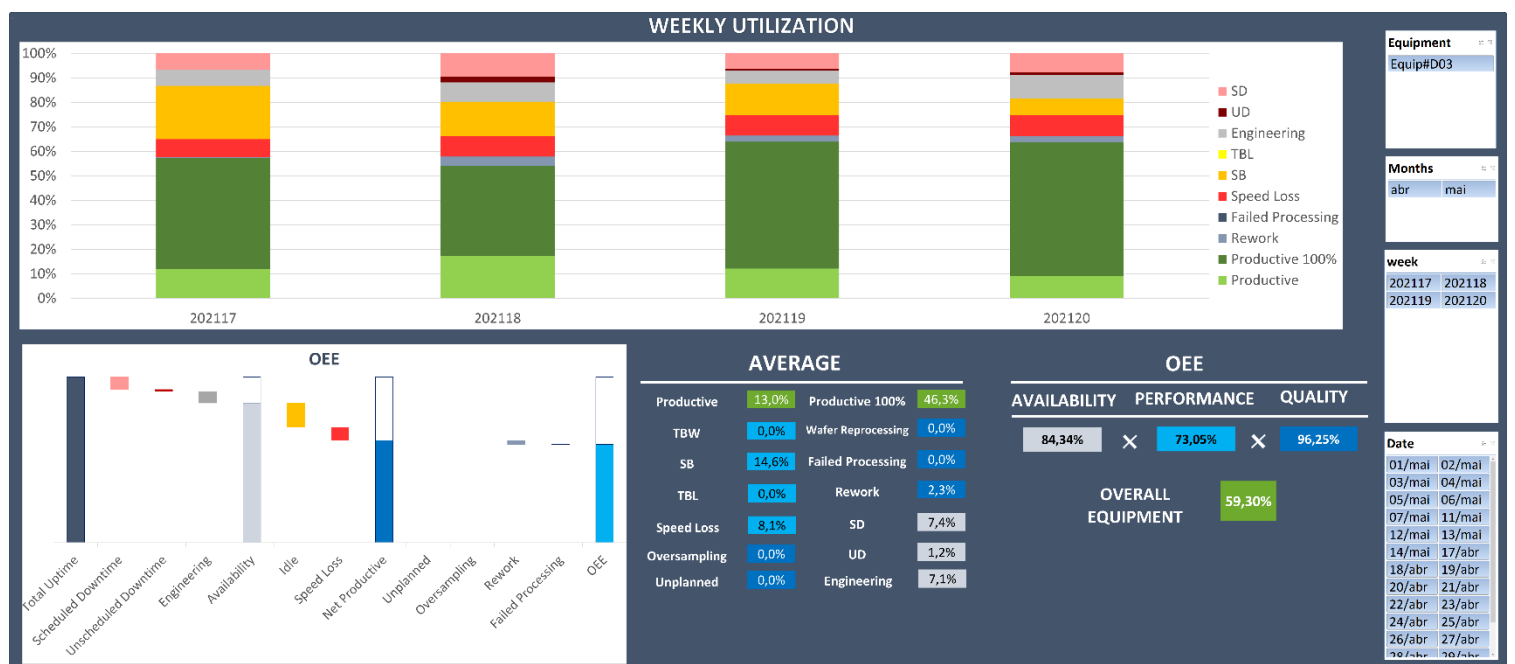


Figura B-3 - Visão geral de alguns equipamentos da família D, entre as semanas w202117 e w202120

Anexo C: Utilização da ferramenta

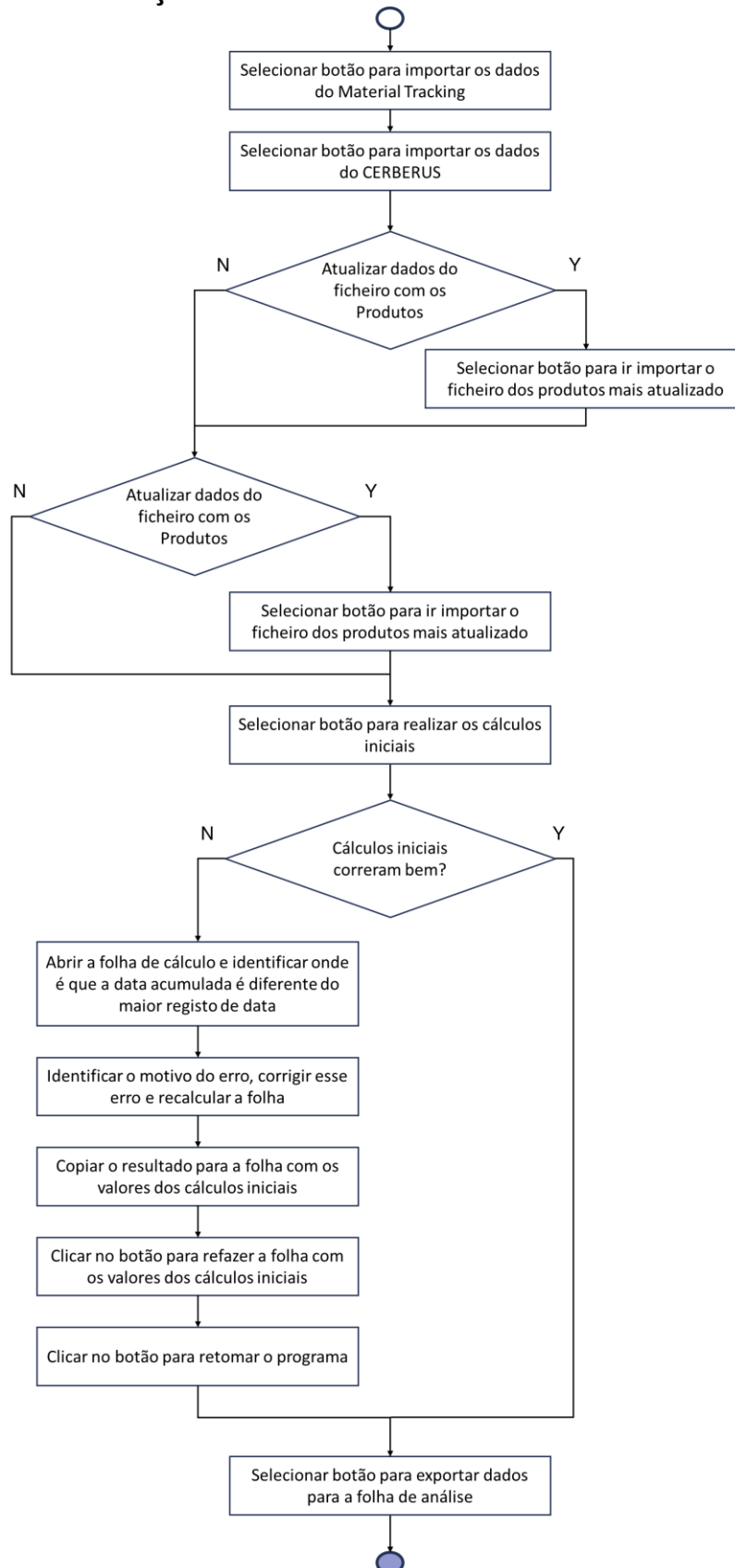


Figura C-1 - Fluxograma da utilização normal da ferramenta

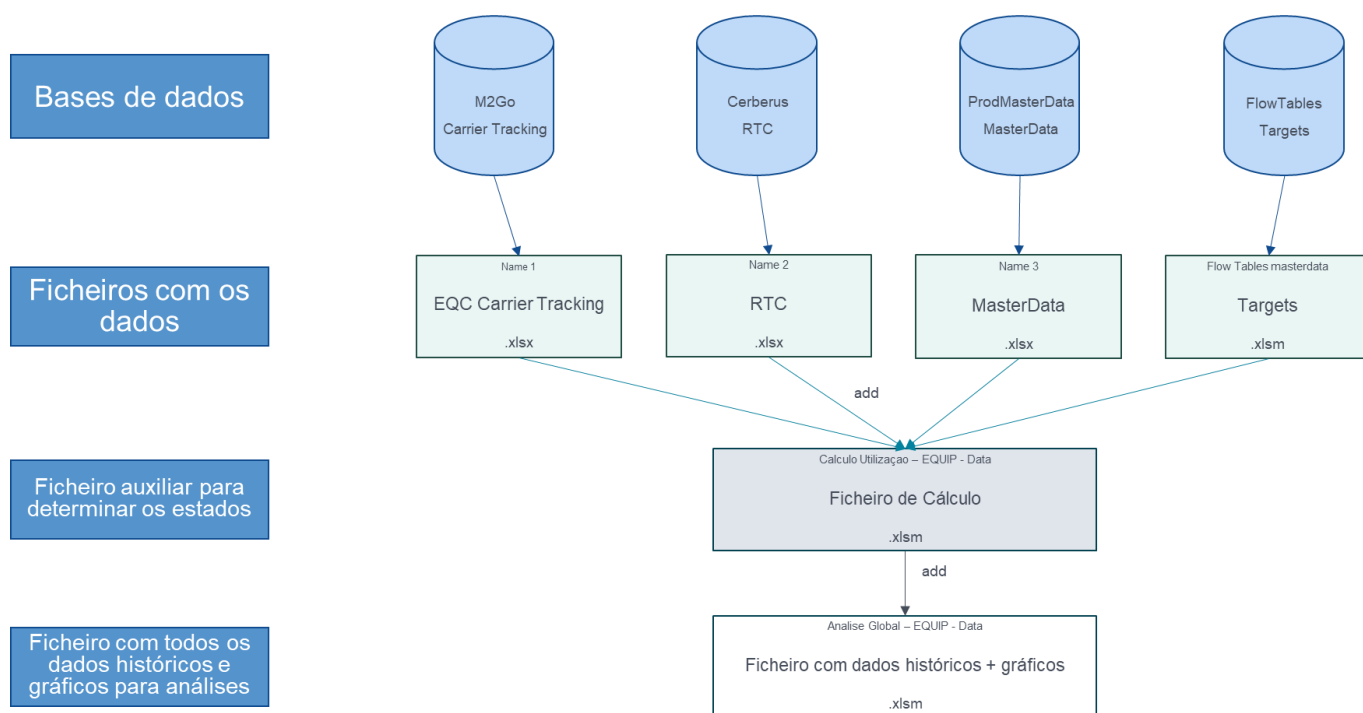


Figura C-2 - Diagrama com as diferentes bases de dados utilizadas

Anexo D: Principais gráficos apresentados pela ferramenta, no ficheiro de análise

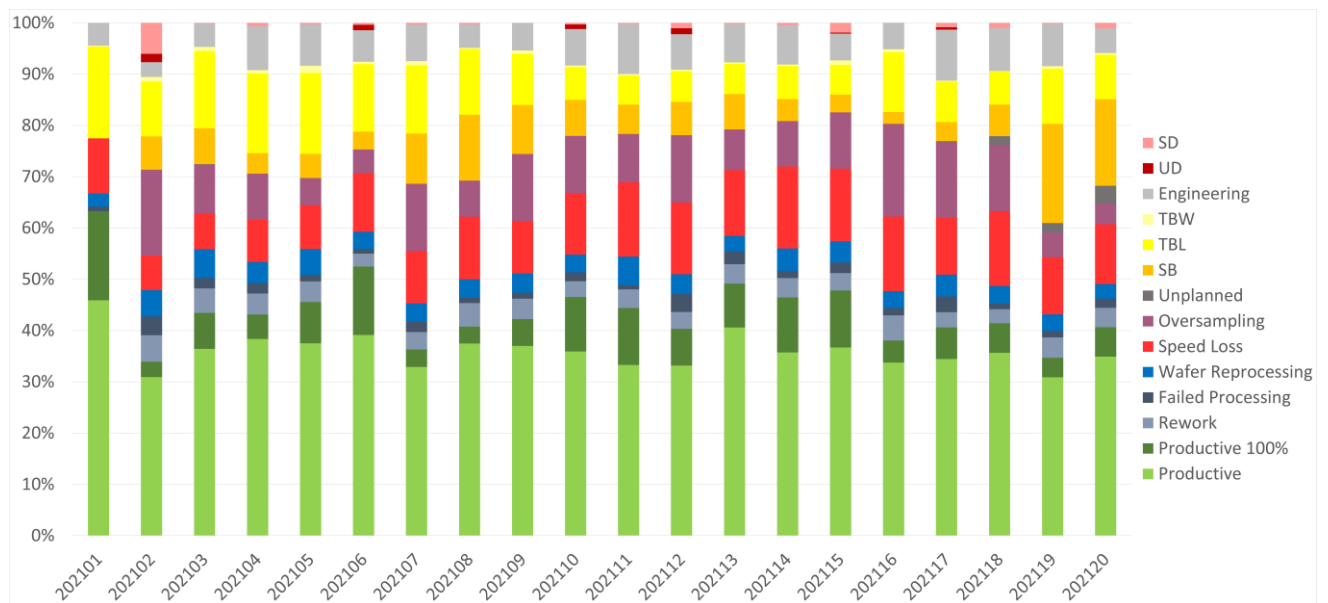


Figura D-1 - Detalhe da utilização semanal dos equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021

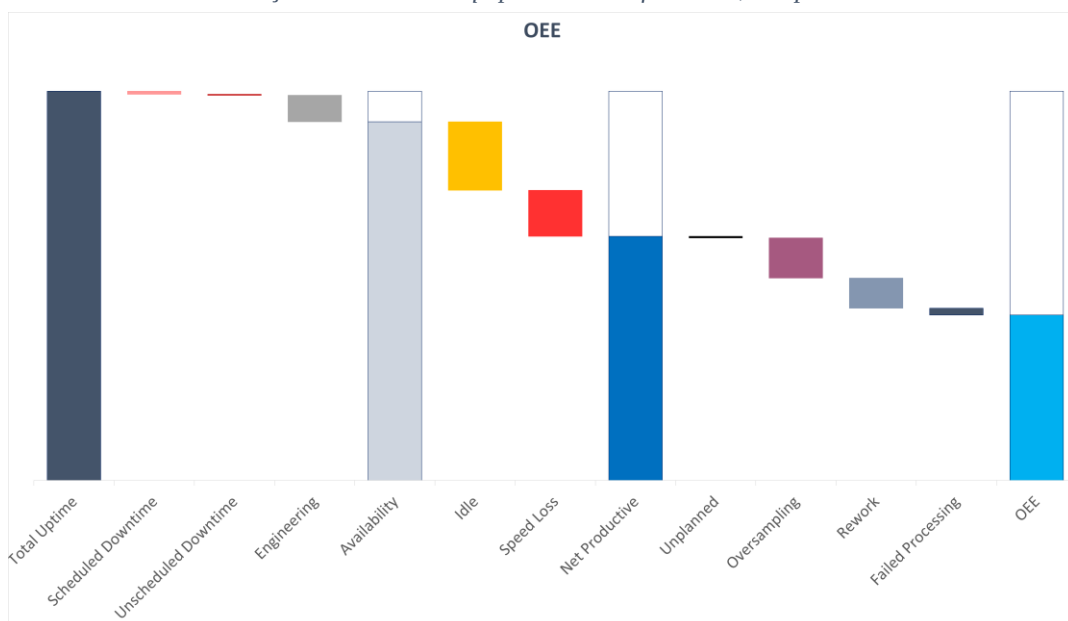


Figura D-2 - Detalhe da repartição dos componentes que afetam o OEE, nos equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021

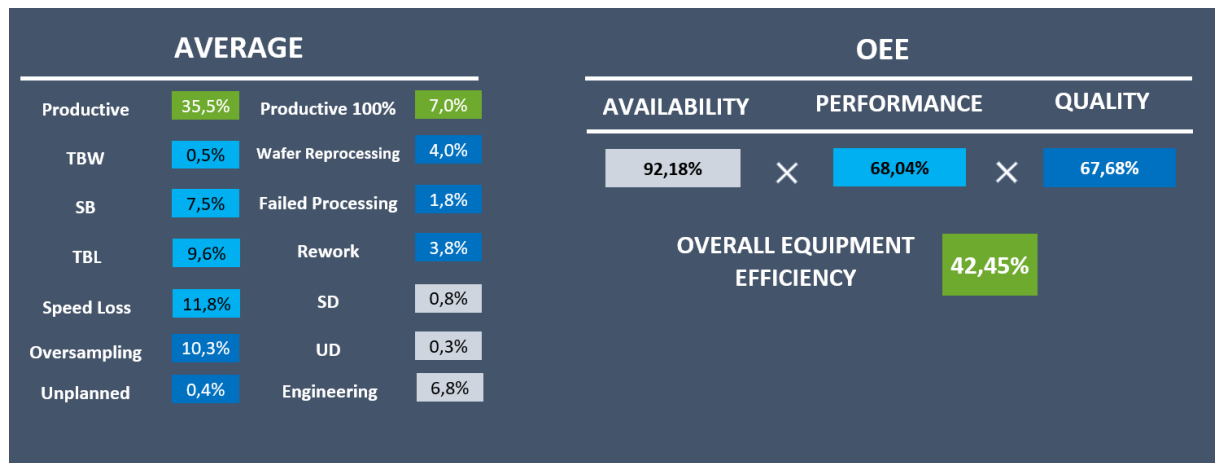


Figura D-3 - Detalhe da ocupação em cada estado e dos termos do OEE para a família A, nas semanas w202101 a w202120

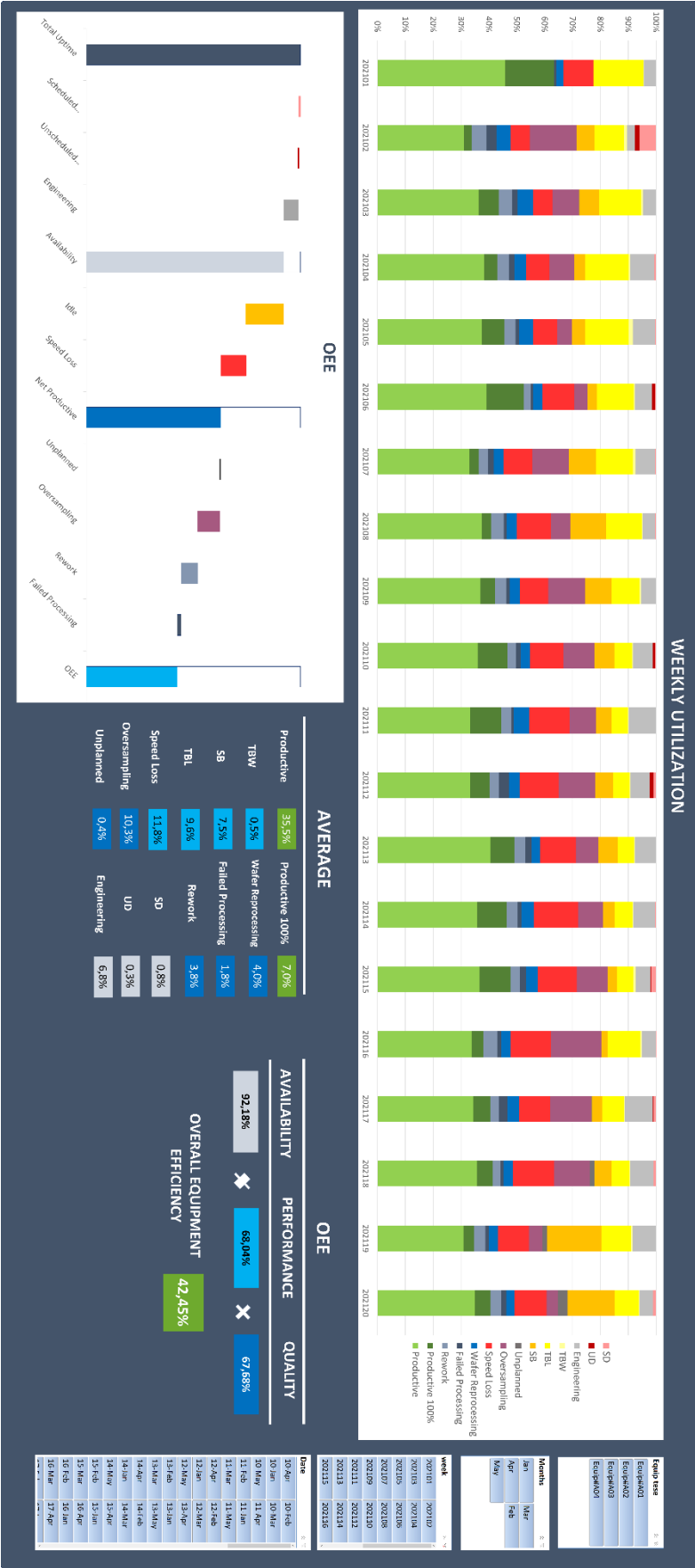


Figura D-4 - Visão geral do conjunto de equipamentos da família A, ao longo das primeiras vinte semanas de 2021, imagem ampliada

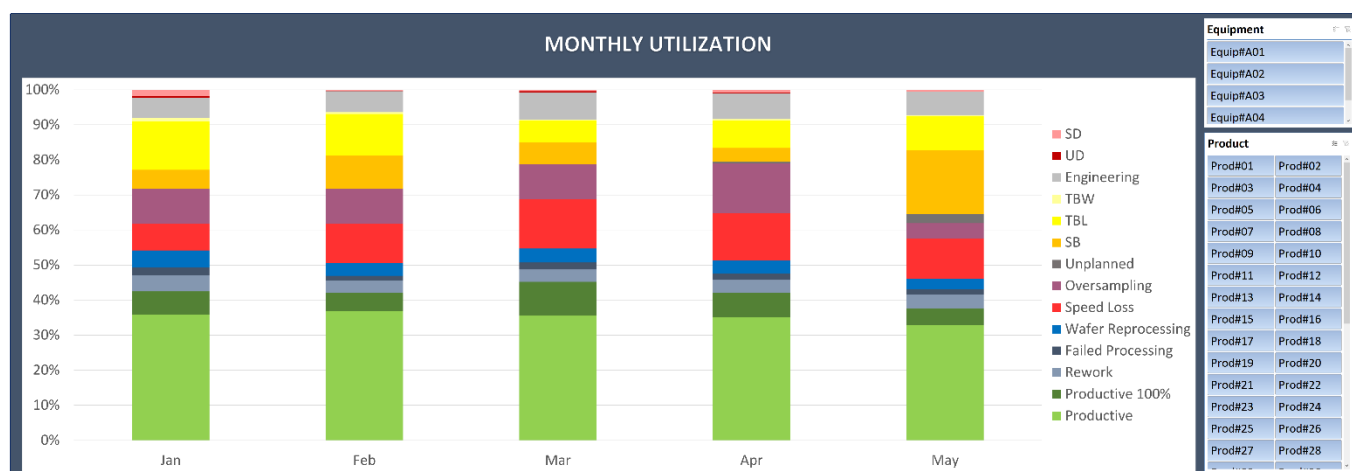


Figura D-5 - Gráfico com a utilização mensal de equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021

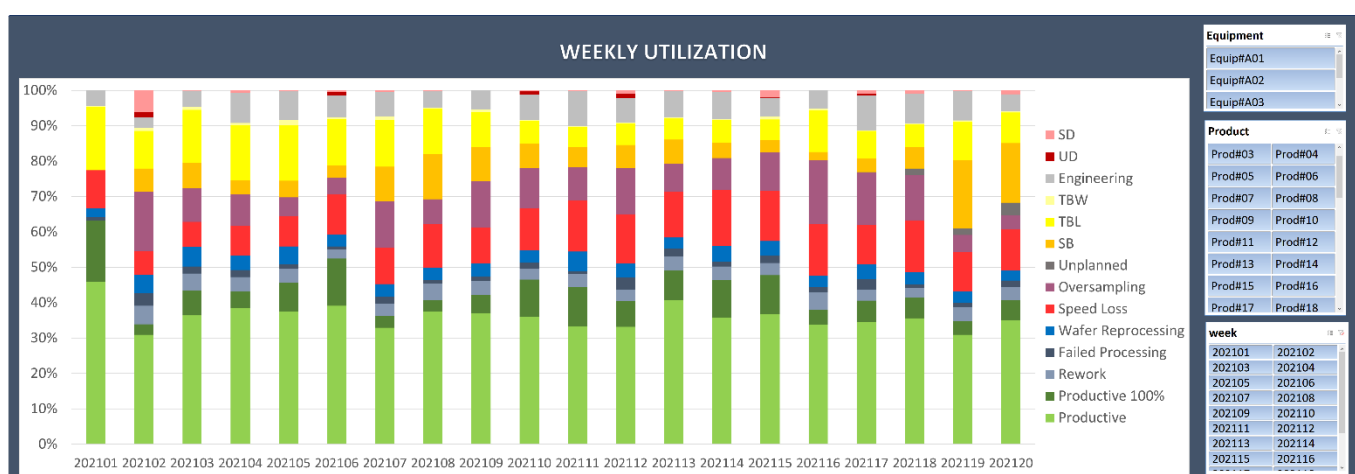


Figura D-6 - Gráfico com a utilização semanal dos equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021

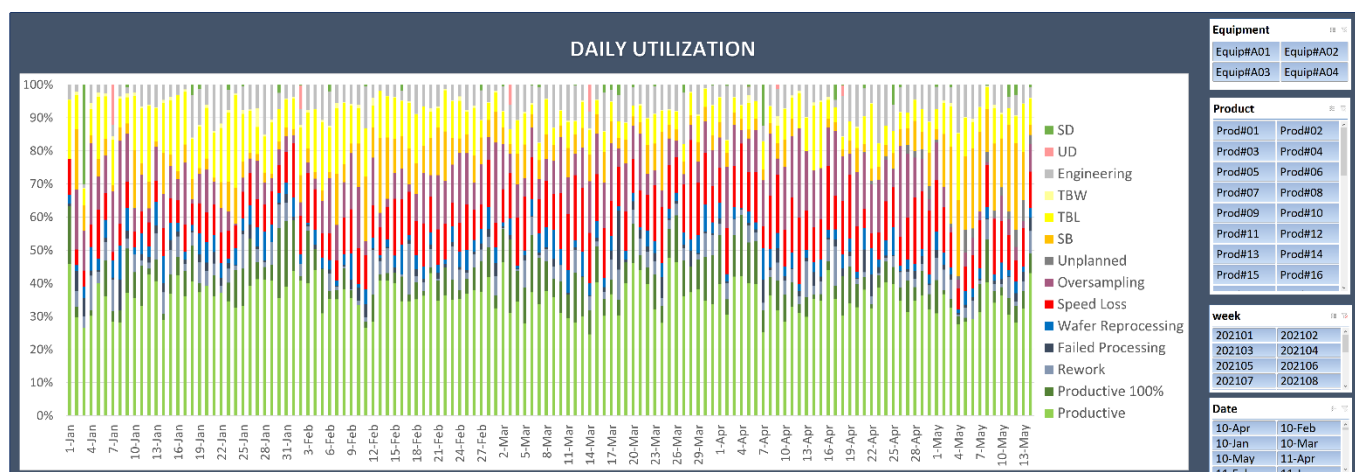


Figura D-7 - Gráfico com a utilização diária dos equipamentos da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021⁸

⁸ Este gráfico é útil para comparar a evolução da utilização para um conjunto não muito alargado de dias, pelo que se deve escolher uma ou duas semanas, de forma a facilitar a leitura.

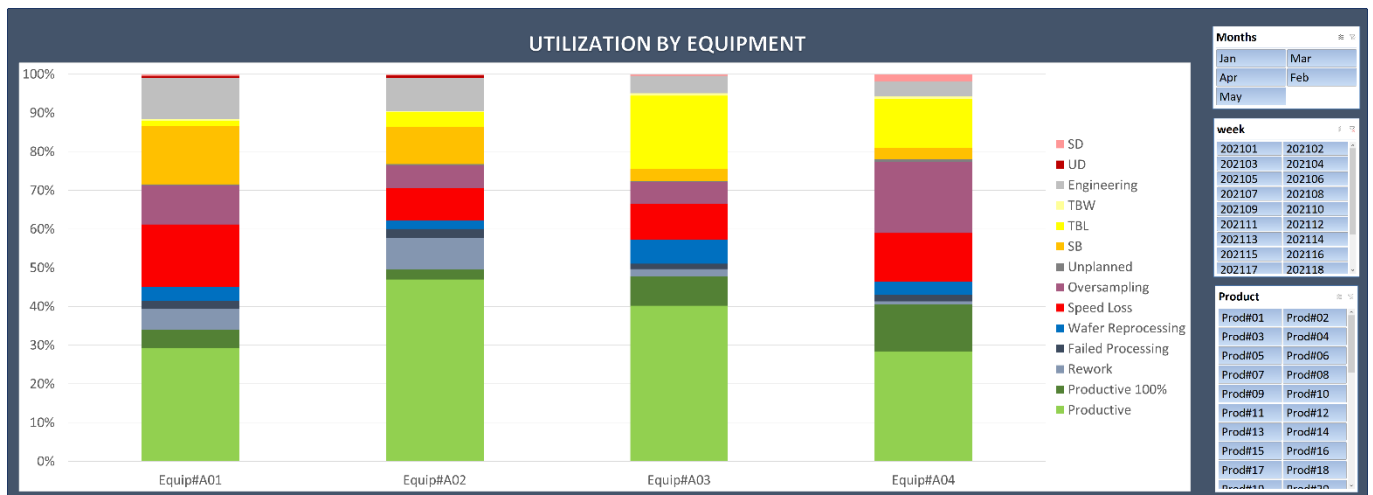


Figura D-8 - Gráfico com a utilização por equipamento da família A, nas primeiras vinte semanas de 2021



Figura D-9 - Relatório de comparação de dois períodos de tempo, exemplo para a família A, nas semanas w202119 e w202120

Desenvolvimento de uma ferramenta de análise da capacidade produtiva numa Indústria de Semicondutores

week	Prod#01	Prod#02	Prod#03	Prod#05	Prod#06	Prod#07	Prod#08	Prod#09	Prod#12	Prod#13	Prod#17	Prod#18	Prod#19	Prod#20	Prod#21	Prod#25	Prod#28	Prod#32	Prod#33	Prod#35	Prod#36	Prod#37
202101	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202102	5,56	0,19	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00
202103	1,20	0,74	3,14	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202104	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,22	0,15	0,80	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	1,13	1,85	0,00	0,00	0,00	1,00
202105	0,00	0,00	3,07	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
202106	0,00	0,00	1,48	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44
202107	0,92	0,01	2,48	0,00	0,00	0,15	0,59	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	1,35	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00
202108	0,00	0,06	0,67	0,00	0,08	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,15	1,05	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
202109	0,00	0,00	2,12	0,00	0,00	0,38	0,89	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
202110	0,00	0,18	0,81	0,00	0,09	1,84	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	1,38	0,00	2,12	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
202111	0,00	0,00	1,50	0,00	0,11	0,00	0,37	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202112	0,00	14,57	1,78	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,04	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
202113	0,00	1,49	4,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,26	0,00	0,15	0,00	0,00	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202114	0,00	0,06	0,39	0,30	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	1,81	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
202115	0,02	0,34	1,42	0,36	0,00	0,16	1,58	0,00	0,03	0,16	0,00	0,00	0,00	6,50	0,40	0,17	0,00	1,02	0,00	0,00	0,11	0,00
202116	0,67	0,92	0,53	0,00	0,00	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,23	0,00	0,08	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00
202117	0,66	0,05	3,19	0,06	0,00	0,00	6,35	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	1,38	0,00	0,00	3,78	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
202118	0,00	0,00	0,66	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202119	0,00	0,62	1,49	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,82	0,00	0,02	0,37	0,00	0,00
202120	1,10	0,09	3,77	0,00	0,00	0,00	1,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,20	0,37	0,00	0,00	1,75	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
Grand Total	10,13	19,30	35,42	0,77	0,28	2,74	14,75	0,80	0,07	1,99	0,55	0,07	2,25	7,26	10,35	0,17	3,63	11,95	0,01	0,02	0,52	1,59

Figura D-10 - Exemplo de parte da tabela dinâmica gerada para análise do Failed Processing, para a família A, relativa às primeiras vinte semanas de 2021

week	Step#26	Step#08	Step#32	Step#20	Step#34	Step#39	Step#27	Step#17	Step#10	Step#11	Step#01
202101	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202102	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
202103	0,10	1,64	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,23	0,00
202104	0,74	0,21	0,46	0,00	0,12	0,00	0,34	0,00	0,00	0,07	0,00
202105	1,89	0,35	0,52	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202106	0,45	0,12	0,13	0,00	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202107	1,46	0,00	0,71	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00
202108	0,00	0,06	0,00	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202109	0,51	0,25	1,02	0,00	0,08	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00
202110	0,20	0,00	0,00	0,06	0,20	0,00	0,21	0,00	0,14	0,00	0,00
202111	0,16	0,15	0,05	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
202112	0,09	0,85	0,45	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202113	0,28	1,28	0,07	0,42	0,26	1,30	1,21	0,01	0,15	0,00	0,00
202114	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00
202115	0,00	0,00	0,00	0,41	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202116	0,00	0,00	0,00	0,18	0,05	0,24	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
202117	0,82	0,15	0,49	0,15	0,07	0,06	0,00	1,35	0,10	0,00	0,00
202118	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,20	0,38	0,00	0,00
202119	0,04	0,56	0,00	0,33	0,19	0,13	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00
202120	0,00	1,04	0,04	0,31	0,37	1,06	0,41	0,55	0,00	0,00	0,00
Grand Total	6,74	6,65	3,93	3,89	3,73	2,78	2,50	2,10	1,49	1,30	0,31

Figura D-11 - Exemplo de parte da tabela dinâmica gerada para análise do Failed Processing para o Prod#03, expandida para os diferentes steps

week	Prod#03	Prod#02	Prod#46	Prod#44	Prod#08	Prod#42	Prod#32	Prod#48	Prod#21	Prod#01	Prod#43
202101	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
202102	0,01	0,19	3,03	1,13	0,41	1,59	0,39	0,00	0,33	5,56	0,00
202103	3,14	0,74	2,06	0,00	0,01	1,68	0,00	0,00	0,01	1,20	0,45
202104	1,95	0,00	0,88	0,44	0,15	0,29	1,85	0,00	0,00	0,00	0,00
202105	3,07	0,00	0,00	0,95	0,57	0,68	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00
202106	1,48	0,00	0,08	1,19	0,10	0,28	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00
202107	2,48	0,01	0,00	0,31	0,59	1,05	0,36	1,77	0,33	0,92	2,38
202108	0,67	0,06	0,22	1,47	0,25	0,53	0,20	2,24	1,05	0,00	0,04
202109	2,12	0,00	0,17	1,67	0,89	0,97	0,00	0,92	0,16	0,00	0,00
202110	0,81	0,18	0,00	2,43	0,00	0,31	0,02	1,78	2,12	0,00	0,17
202111	1,50	0,00	0,18	2,01	0,37	0,00	0,00	0,37	0,57	0,00	0,00
202112	1,78	14,57	1,92	3,72	0,46	0,23	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00
202113	4,96	1,49	3,71	1,47	0,00	0,82	0,93	1,96	0,15	0,00	0,44
Equip#A01	1,43	0,00	0,96	1,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Equip#A02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93	0,00	0,15	0,00	0,00
Equip#A03	2,04	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00
Equip#A04	1,49	0,76	2,75	0,21	0,00	0,82	0,00	1,74	0,00	0,00	0,44
202114	0,39	0,06	0,23	0,33	1,00	1,07	0,01	0,00	1,81	0,00	0,03
202115	1,42	0,34	0,00	0,06	1,58	0,37	1,02	0,00	0,40	0,02	0,63
202116	0,53	0,92	0,08	0,01	0,36	1,29	0,61	0,00	1,23	0,67	2,87
202117	3,19	0,05	2,94	0,01	6,35	0,56	3,78	0,00	1,38	0,66	0,55
202118	0,66	0,00	0,60	0,42	0,00	0,05	0,23	0,00	0,44	0,00	0,18
202119	1,49	0,62	1,12	0,09	0,25	0,04	0,82	0,00	0,00	0,00	0,28
202120	3,77	0,09	0,76	0,14	1,41	1,41	1,75	0,00	0,37	1,10	0,03
Grand Total	35,42	19,30	17,99	17,87	14,75	13,20	11,95	10,71	10,35	10,13	8,04

Figura D-12 - Exemplo de parte da tabela dinâmica gerada para análise do Failed Processing, com a semana w202113 expandida para os diferentes equipamentos

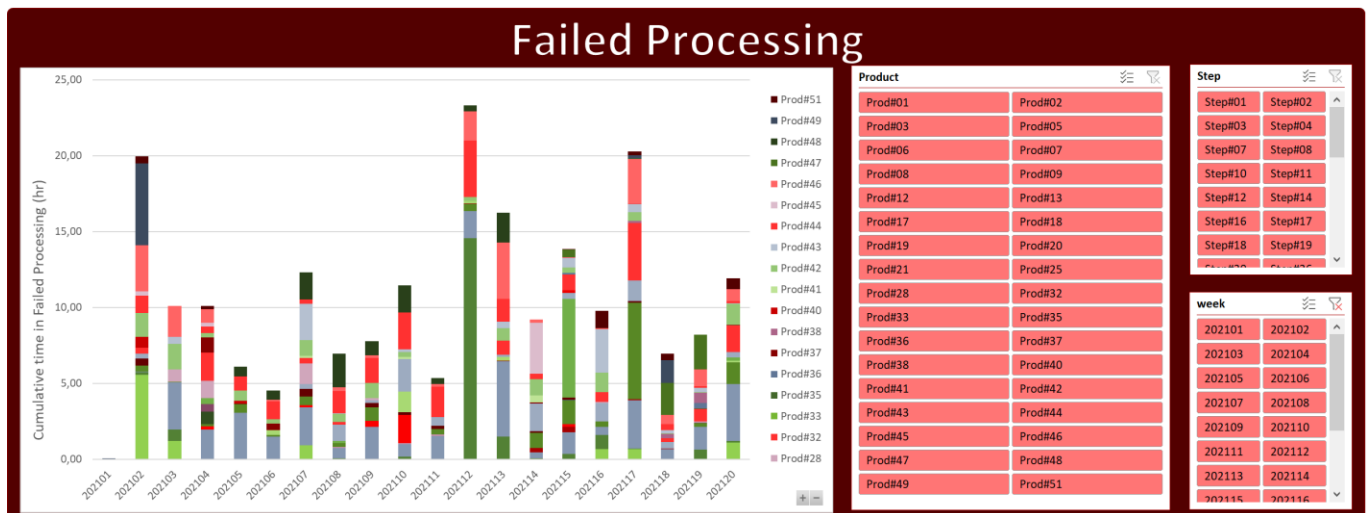


Figura D-13 - Gráfico com a evolução do tempo acumulado por semana no estado Failed Processing, para a família A, entre as semanas w202101 e w202120

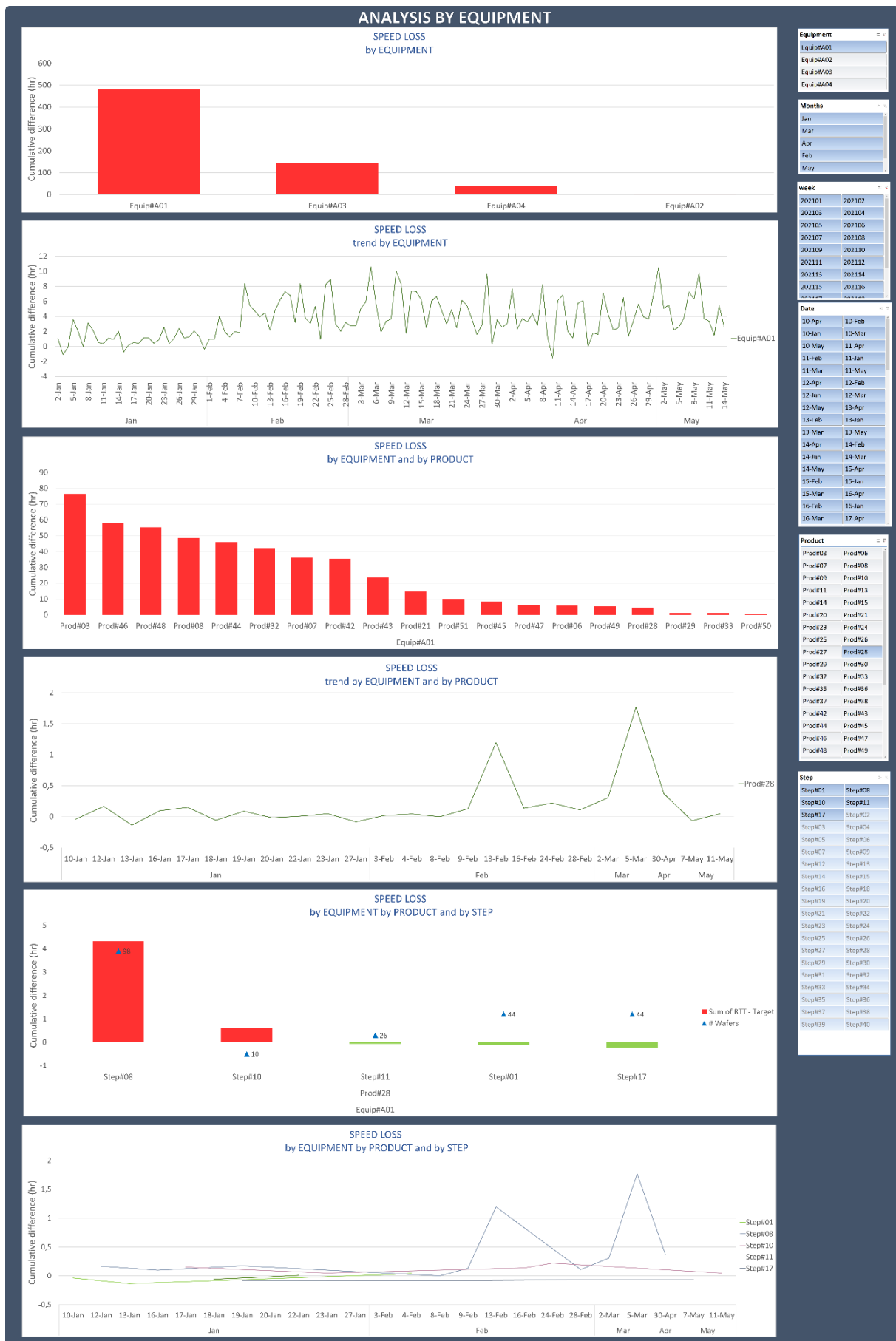


Figura D-14 - Relatório de análise do Speed Loss - Análise por equipamento

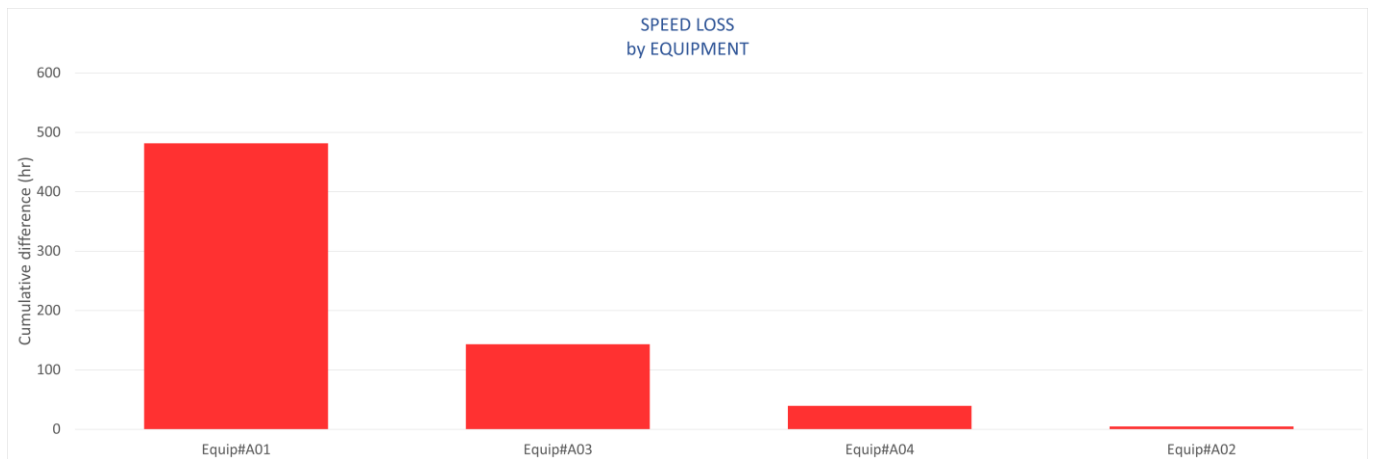


Figura D-15 – Distribuição do Speed Loss acumulado por equipamento, para uma família, entre w202101 e w202120

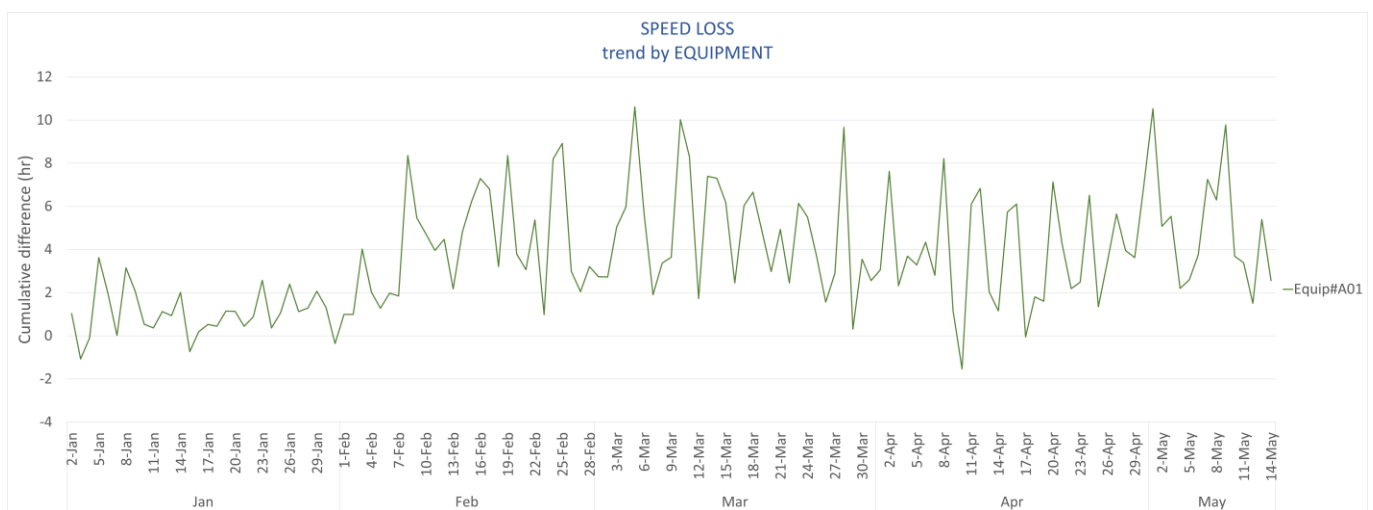


Figura D-16 - Evolução do Speed Loss acumulado para o equipamento escolhido, nas primeiras vinte semanas de 2021

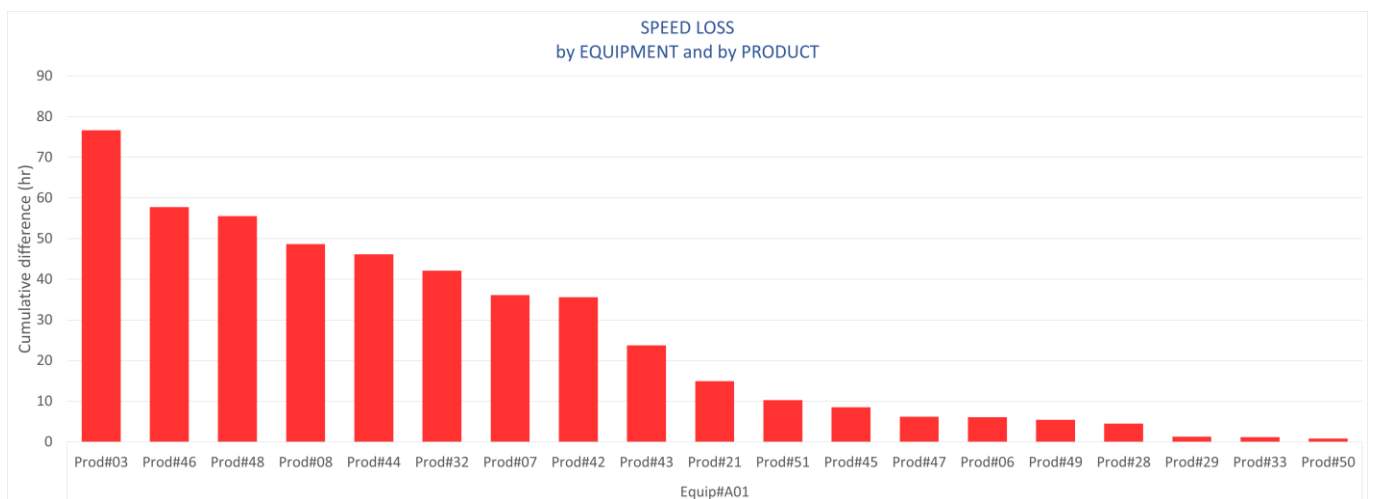


Figura D-17 – Distribuição do Speed Loss acumulado, por produto, para o equipamento selecionado, entre as semanas w202101 e w202120

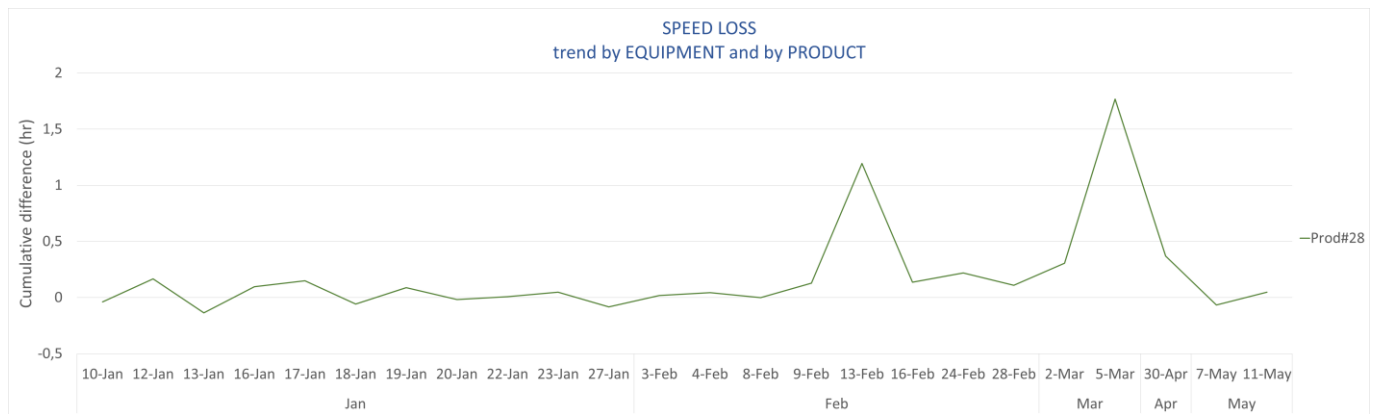


Figura D-18 - Evolução temporal do Speed Loss acumulado de um produto, no equipamento selecionado

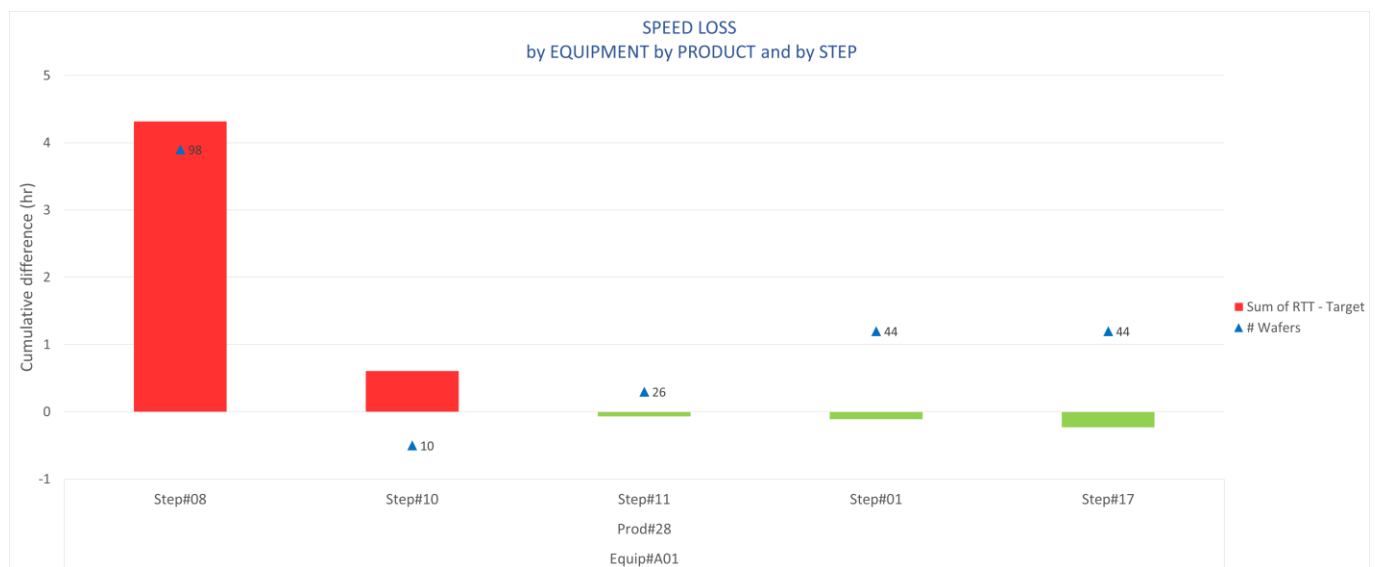


Figura D-19 - Distribuição do Speed Loss acumulado por step, no produto e no equipamento escolhidos, e indicação do número de wafers processadas

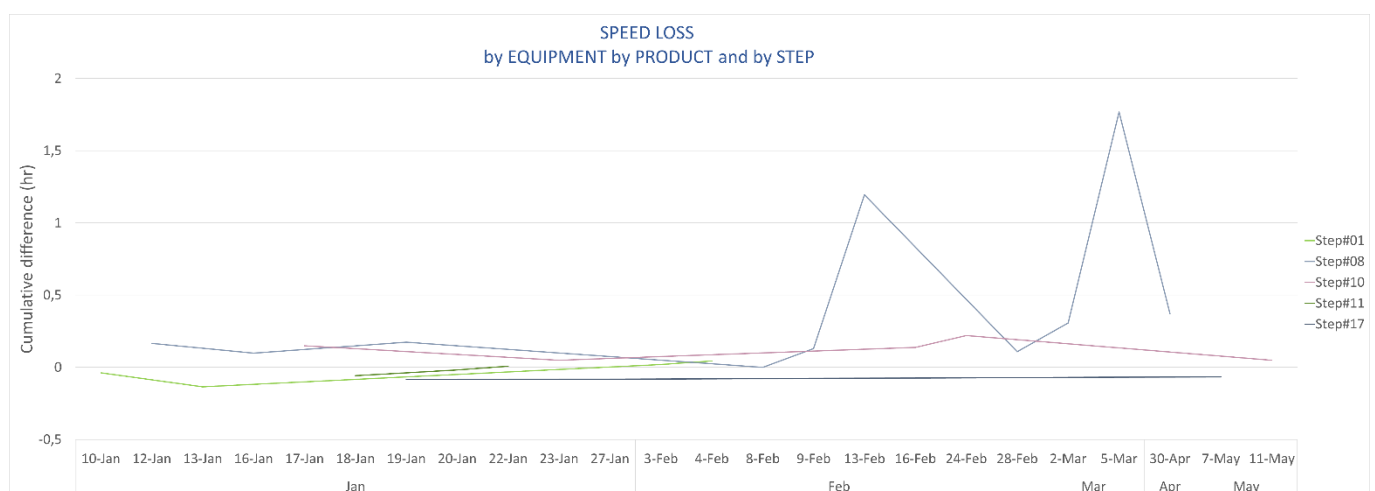


Figura D-20 - Evolução temporal do Speed Loss acumulado, por step, para o produto e equipamentos selecionados

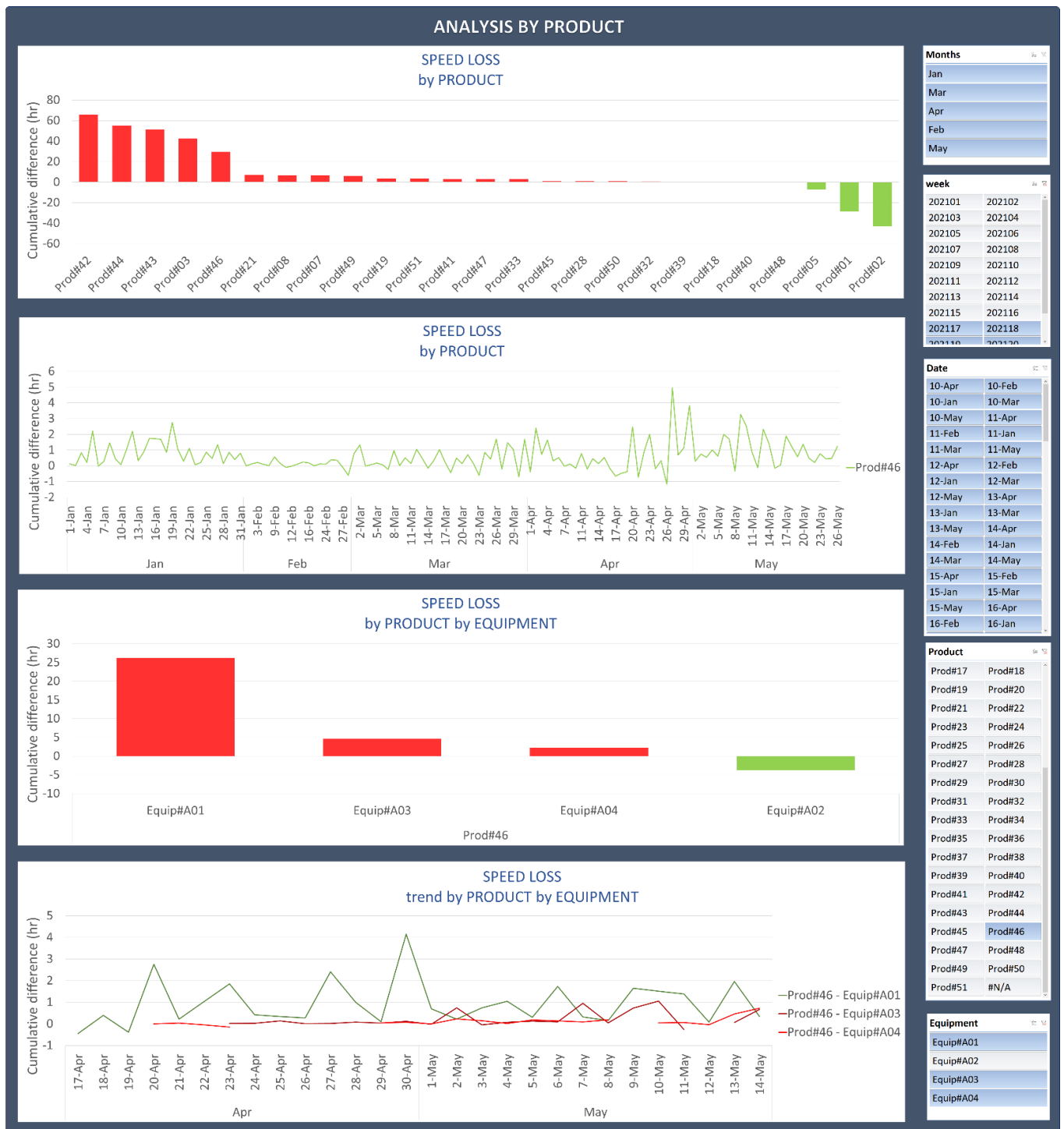


Figura D-21 - Relatório de análise do Speed Loss - Análise por produto

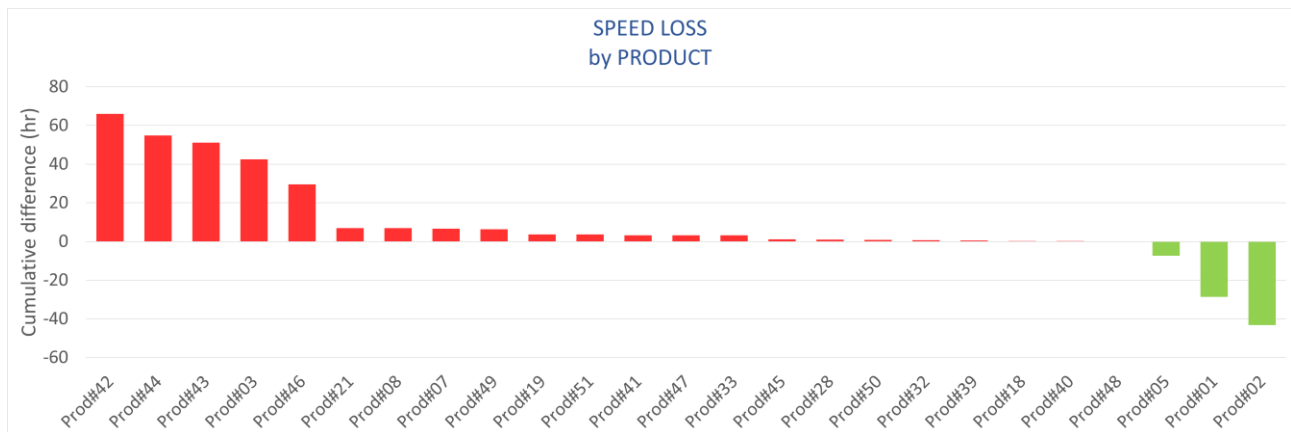


Figura D-22 - Distribuição do Speed Loss acumulado por produto, para uma família, entre w202101 e w202120

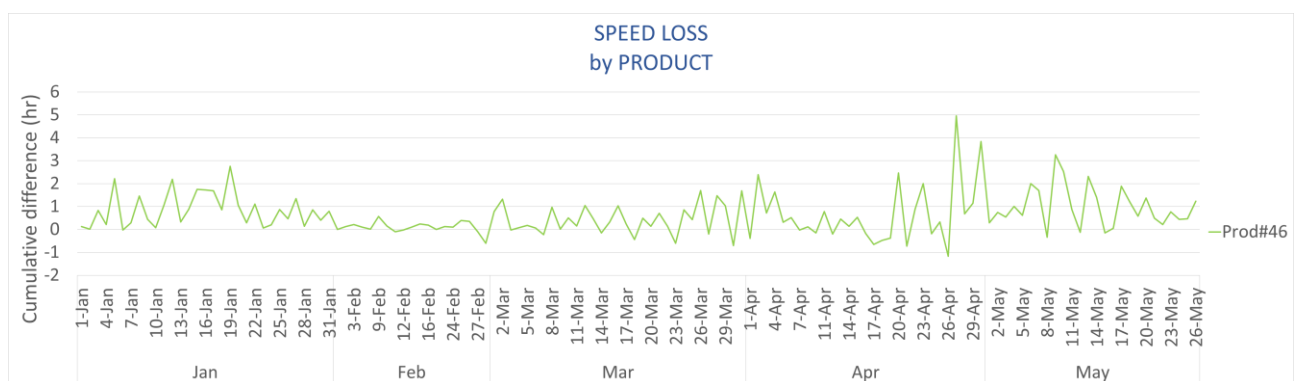


Figura D-23 - Evolução do Speed Loss acumulado para o produto escolhido, nas primeiras vinte semanas de 2021

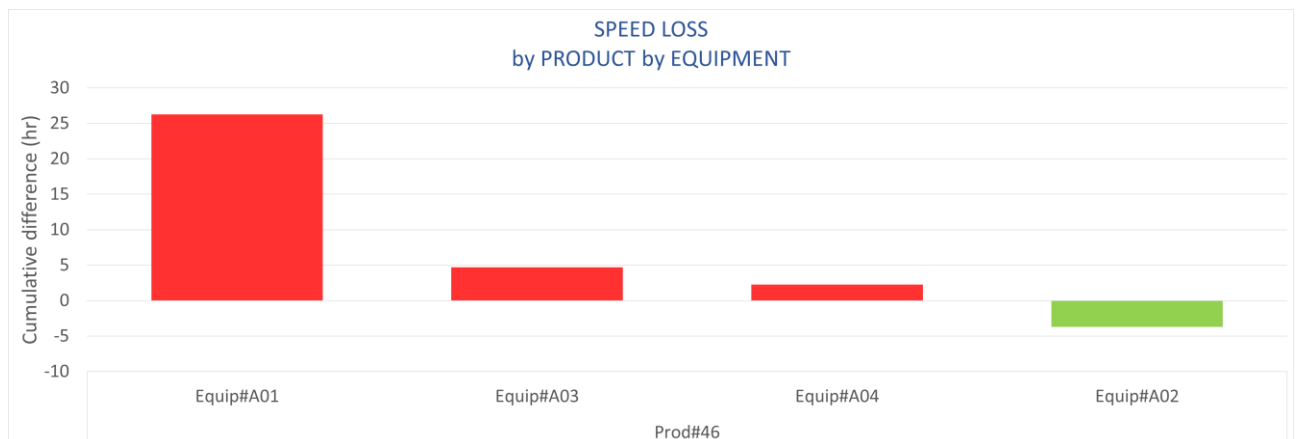


Figura D-24 - Distribuição do Speed Loss acumulado por equipamento, para o produto escolhido

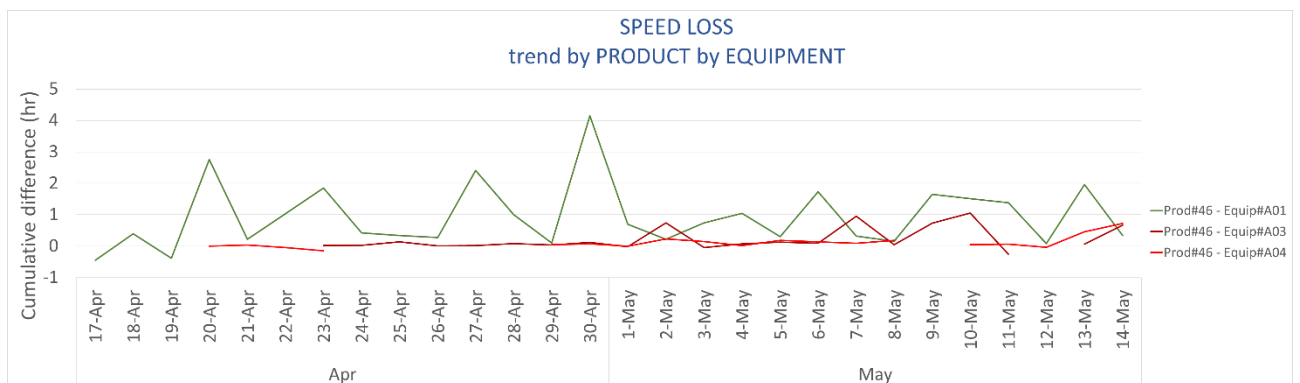


Figura D-25 - Evolução do Speed Loss acumulado em cada equipamento, para o produto selecionado

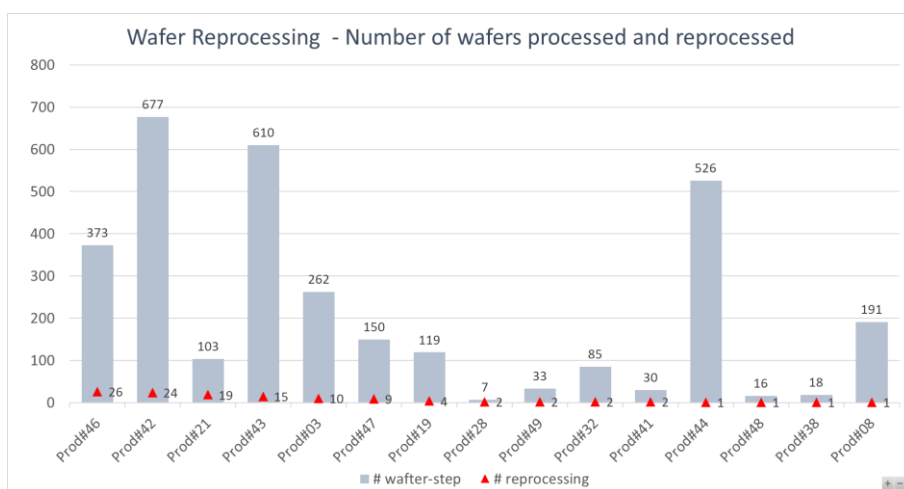


Figura D-26 - Gráfico com o número de wafer-step⁹ processados, e número de reprocessamentos, por produto, numa semana, para uma família de equipamentos

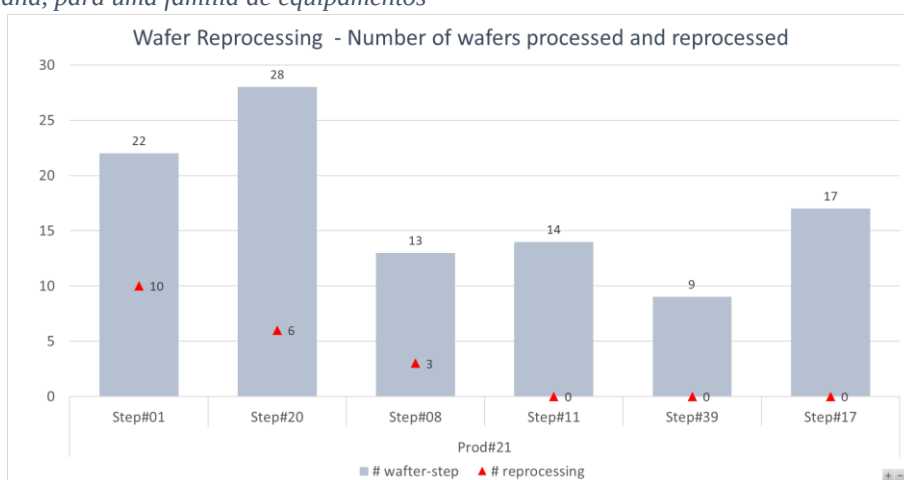


Figura D-27 - Gráfico com o número de wafer-step processados, e número de reprocessamentos, para um produto, por step, numa semana, para uma família de equipamentos

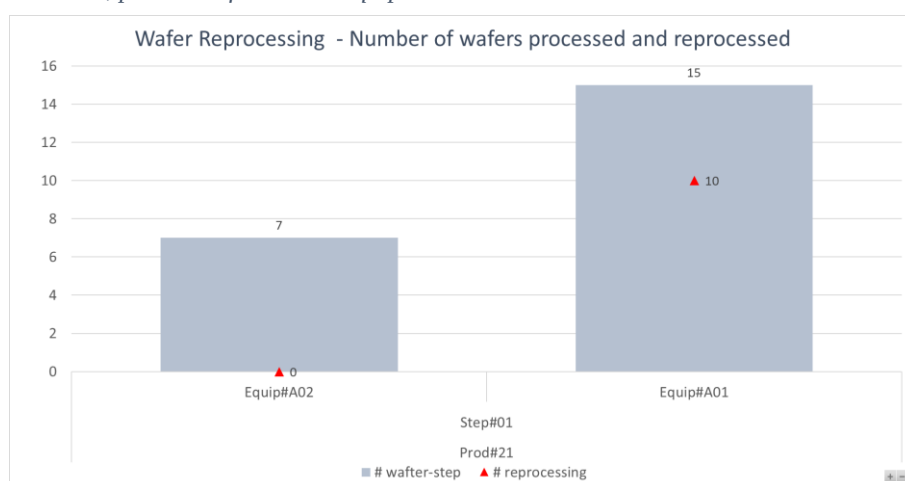


Figura D-28 - Gráfico com o número de wafer-step processados, e número de reprocessamentos, para um produto, para um step, por equipamento, numa semana

⁹ Wafer-step: designação atribuída ao par wafer e step associados a um processamento. Se duas wafers realizarem três steps diferentes, então foram processadas apenas duas wafers, mas considera-se que foram processados seis pares wafer-step.

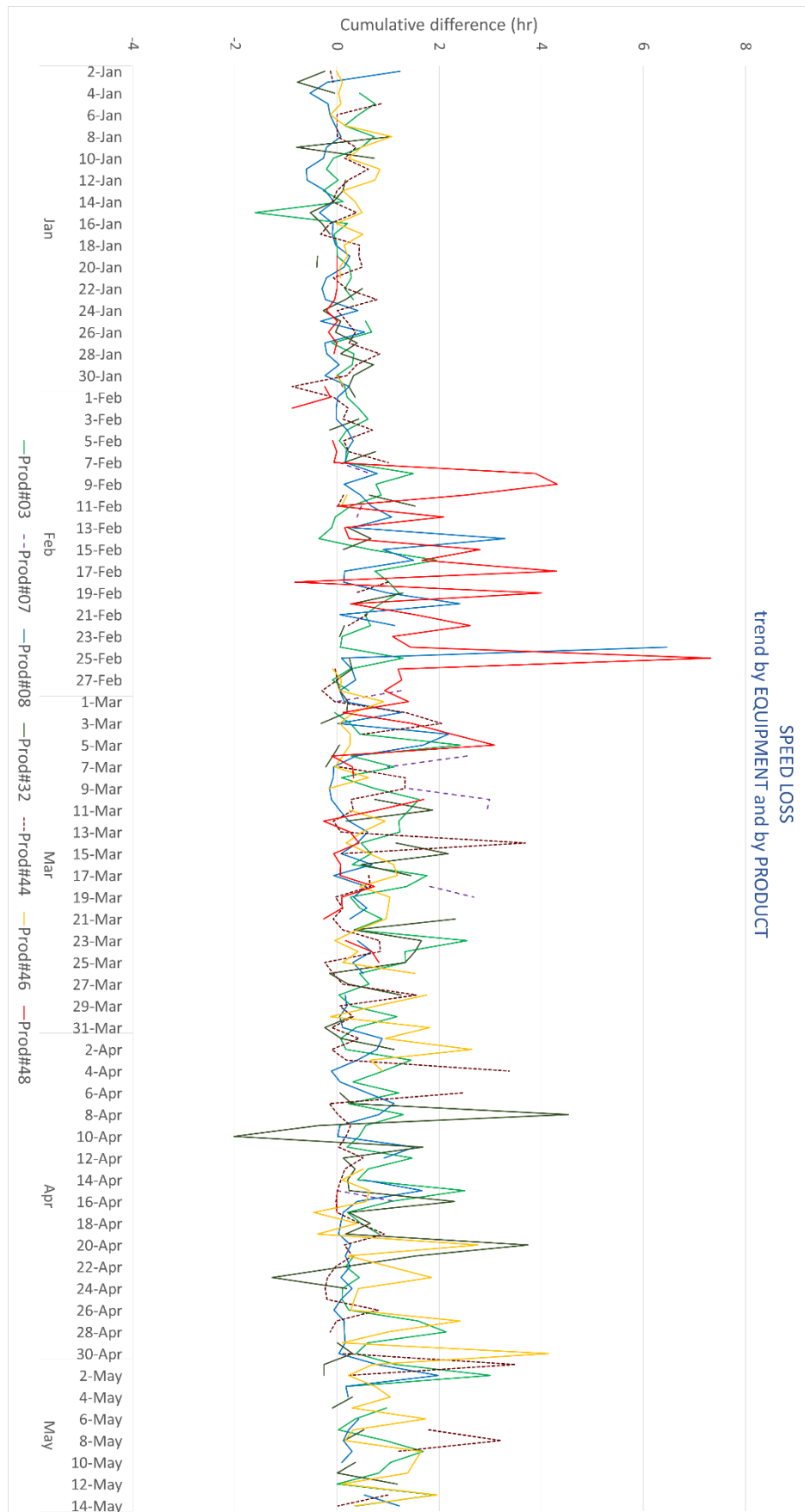


Figura D-29 - Evolução do Speed Loss acumulado diariamente, no Equip#01 e para os produtos Prod#03, Prod#07, Prod#08, Prod#32, Prod#44, Prod#46 e Prod#48, nas semanas w202108 - w202120

Anexo E: Gráficos de suporte à análise do *Wafer Reprocessing*, gerados pela ferramenta

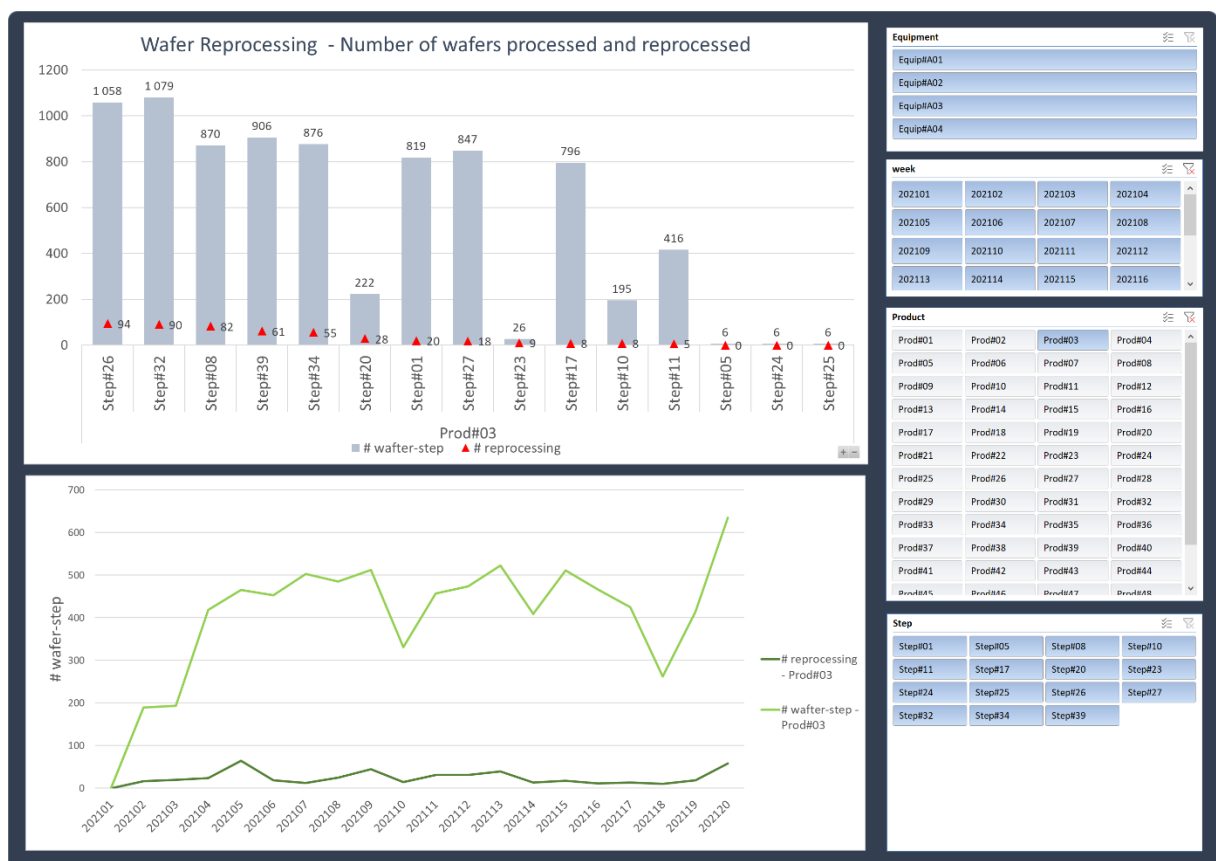


Figura E-1 - Relatório com a distribuição dos processamentos e reprocessamentos para o Prod#03, por step

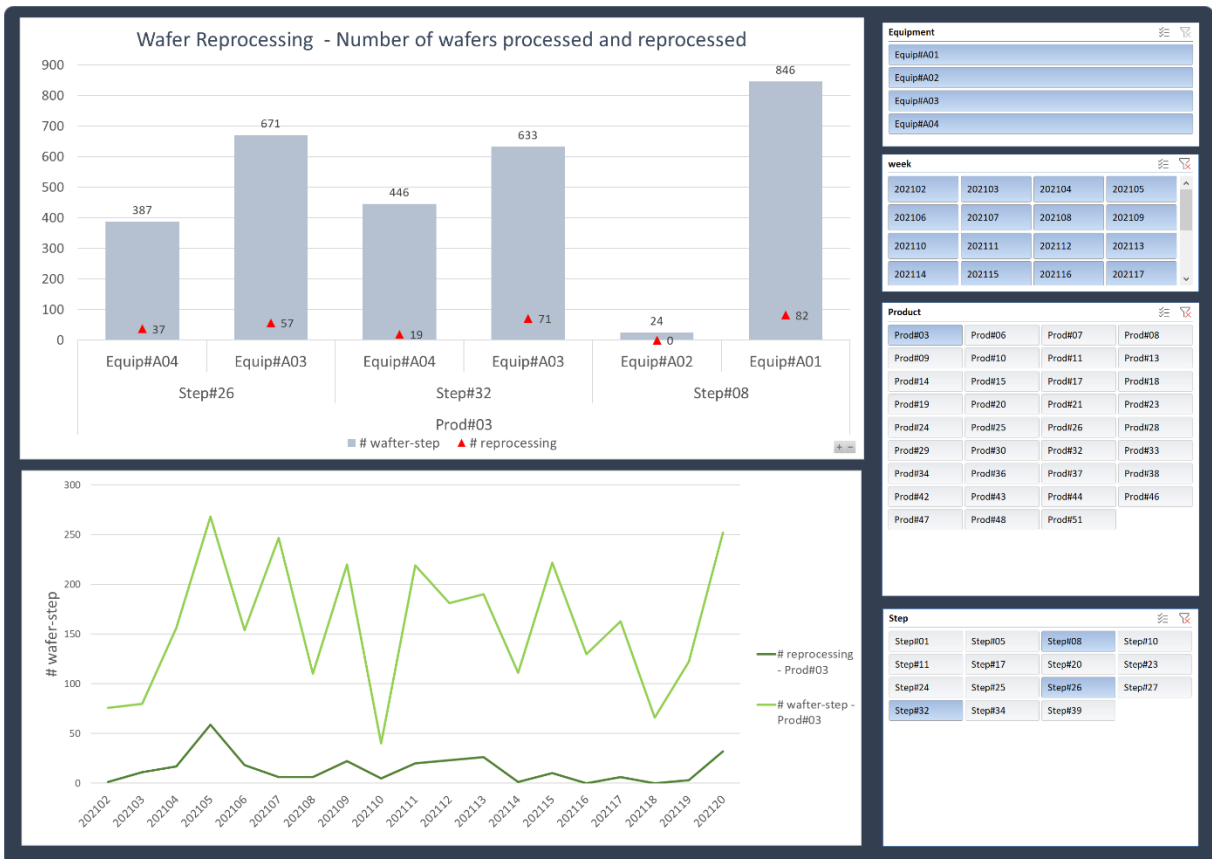


Figura E-2 - Relatório com a distribuição dos processamentos e reproprocessamentos para o Prod#03, nos Step#08, Step#26 e Step#32, por equipamento

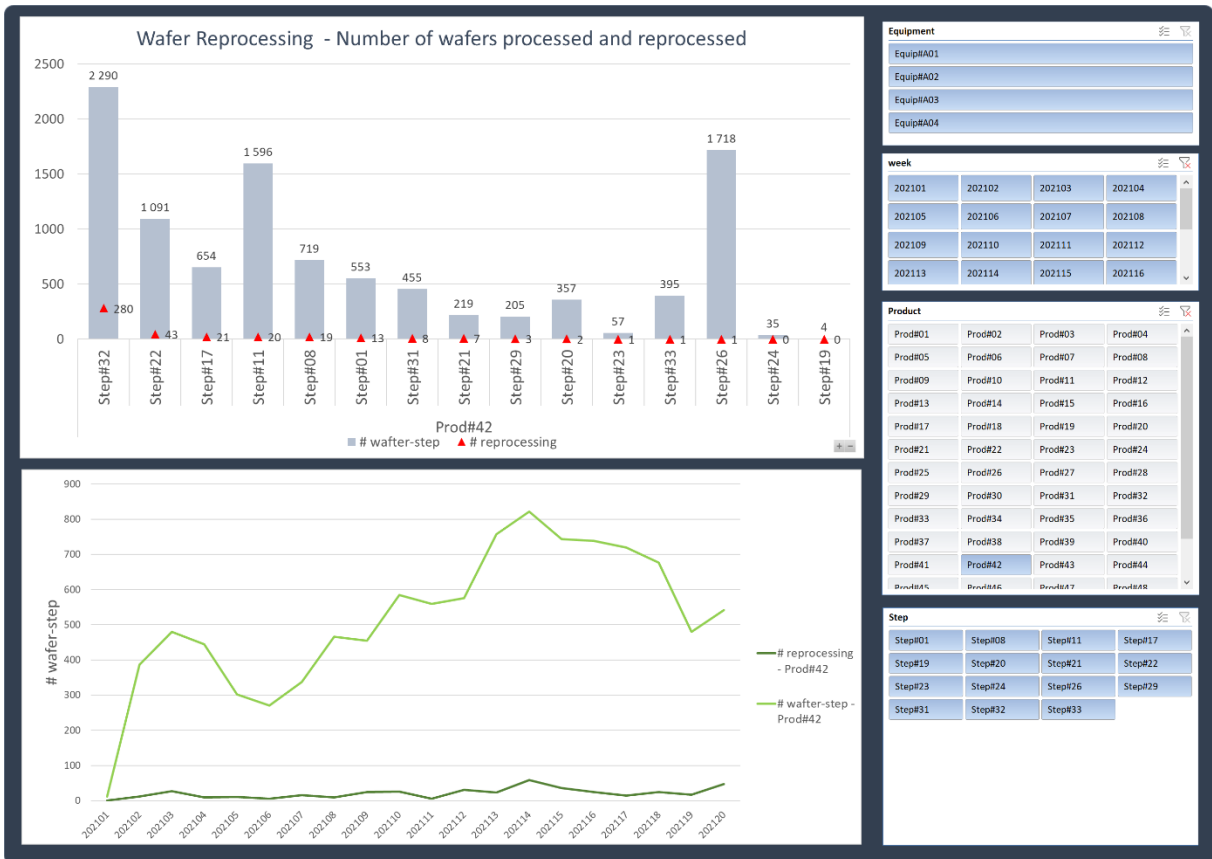


Figura E-3 - Relatório com a distribuição dos processamentos e reproprocessamentos para o Prod#42, por step

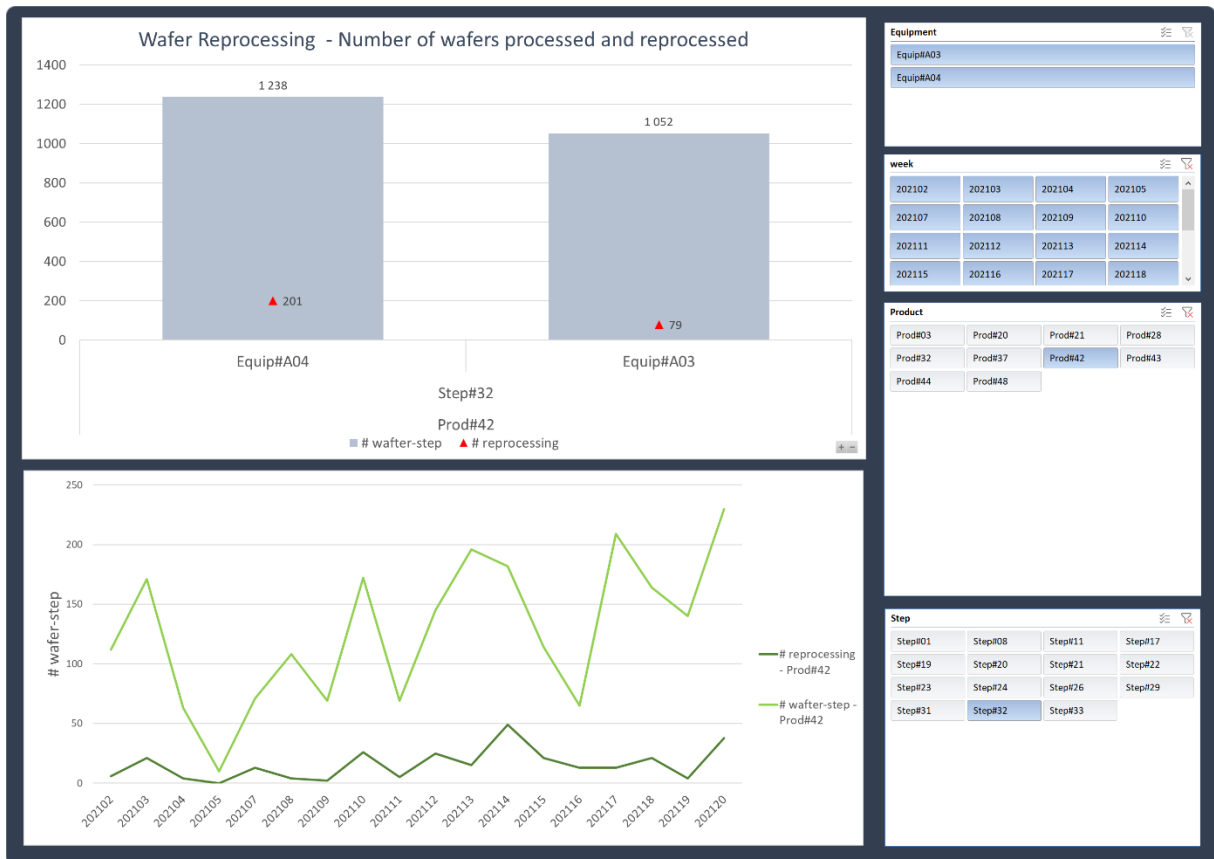


Figura E-4 - Relatório com a distribuição dos processamentos e reproprocessamentos para o Prod#42, no Step#32, por equipamento

Anexo F: Monitorização e estimativa do RTT (trabalho futuro)

Uma funcionalidade que está a ser desenvolvida consiste na capacidade de monitorizar o RTT de um dado *step*, num determinado produto. Este módulo tem interesse para analisar a evolução do RTT de um (ou mais) *step(s)* quando está a ser realizado num (ou mais) produto(s).

The interface is designed for selecting a product and a step to estimate the RTT. It includes a 'Product' dropdown menu, a 'Step' dropdown menu, and an 'RTT ESTIMATION' button. Below the button, the estimated RTT is displayed as '6,71 min'. The interface also features two 'WEIGHTS' sections, each with four columns (I, II, III, IV) and a 'TOTAL 100%' label. The first 'WEIGHTS' section is for 'Equipment' with options Equip#A03, Equip#A04, Equip#A01, and Equip#A02. The second 'WEIGHTS' section is for 'Month' with options jan, fev, mar, and abr. A 'Multiplier Factor' input field is set to '1'.

Figura F-1 - Menu de seleção do produto, step e ponderação dos diferentes equipamentos e meses, para a estimativa do RTT

Para estimar o RTT é realizada uma média ponderada dos RTT, com uma ponderação em termos de equipamentos em que o *step* é realizado e em termos de mês em que decorreu o processamento. Uma vez que equipamentos diferentes podem ter funcionamentos distintos, é possível atribuir um peso diferente de forma a ter em conta esta diferença nas máquinas.

Esta ponderação encontra-se exemplificada na Figura F-1. De forma idêntica, pode ser interessante atribuir um peso superior aos dados mais recentes, o que justifica a diferente ponderação que se pode atribuir aos dados de acordo com o mês a que dizem respeito. Definiu-se, por hipótese, quatro conjuntos para agregar os equipamentos. Também foram estabelecidas quatro agregações para os meses, para realizar as ponderações. De seguida, é possível adicionar

um fator de correção, caso se pretenda multiplicar o RTT obtido por um fator introduzido pelo utilizador. Similarmente, é possível adicionar ou subtrair um fator corretivo, para, por exemplo, levar em conta a diferença entre o início e o fim das operações e os momentos em que as transações são detetadas, caso esta diferença seja significativa.

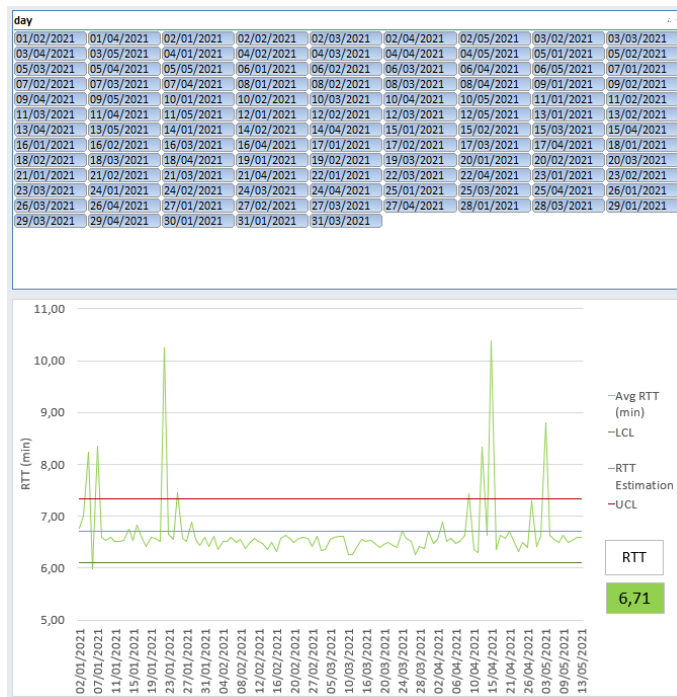


Figura F-2 - Exemplo do gráfico apresentado com a evolução temporal do RTT para o(s) produto(s) e step(s) selecionados



Figura F-3 - Exemplo do gráfico apresentado com a evolução temporal do RTT para o(s) produto(s) e step(s) selecionados - sem os outliers encontrados anteriormente

No que toca à análise da evolução do RTT, são estabelecidos dois limites de controlo, um superior e outro inferior, distanciados da linha central - média ponderada – por um múltiplo do desvio padrão dos dados. Este múltiplo está definido como uma unidade no exemplo apresentado na Figura F-2. O valor mais correto para este múltiplo ainda tem de ser estudado no futuro. Recorrendo ao gráfico da mesma figura, é possível identificar dias com um RTT médio que correspondem a *outliers*. Deve-se analisar estas situações e, caso se justifique, remover estes dias da análise, o que é feito simplesmente por remover a seleção dessas datas, como exemplificado na Figura F-3.

Em termos de trabalho futuro, e para além do que já foi mencionado, é necessário validar os resultados obtidos para esta família de equipamentos e testar para outras. Depois, propõe-se um estudo de diferentes formas de filtrar os dados, ou um número diferente de agregações para as ponderações – em vez de quatro para equipamentos e quatro para meses. Também era interessante adicionar funcionalidades para estimar o RTT, para um dado step, de acordo com o número de dies da *wafer*, ou da dimensão da *wafer*, para se obter uma estimativa para produtos novos.

Anexo G: Diferentes abordagens para cruzamento de dados com o CERBERUS (trabalho futuro)

A forma como os dados do CERBERUS são introduzidos no Nível III da ferramenta é um tema em análise que, por restrições associadas à duração do presente projeto, ainda não foi possível fechar. O cruzamento dos dados com o CERBERUS na ferramenta permite encontrar um estado nos dados do CERBERUS que se pretende que seja representativo do real estado do equipamento, durante a maior parte do TBL¹⁰. Esta limitação de encontrar apenas um estado tem algum impacto, uma vez que é comum encontrar, durante a duração de um TBL, por exemplo, dois, três ou até mais de meia dúzia de estados diferentes no CERBERUS. Pretende-se estabelecer uma regra geral para definir qual o estado que representa melhor a realidade. Atualmente, o estado selecionado é o estado que está definido no CERBERUS a um terço da duração do TBL. Esta solução foi apresentada na Secção 4.4.2 do presente relatório, sendo que um estudo mais aprofundado é sugerido como trabalho futuro.

Com o estado do CERBERUS encontrado, inicialmente selecionava-se a duração desse estado e parte do TBL era então sobreposta com o estado do CERBERUS, e a diferença entre a duração do TBL e a duração do estado no CERBERUS mantinha-se associada a TBL. Este é o método A. A principal vantagem do método A é que o tempo que a ferramenta associa ao estado do CERBERUS nunca é superior à duração desse próprio estado. Assim, esta duração corresponde a um valor real, mesmo que represente apenas parte da realidade (pode ser truncado). Este método tem bons resultados quando só existe um estado – ou existem vários de curta duração e um claramente dominante – no CERBERUS durante o TBL, como é o caso da Figura G-1.

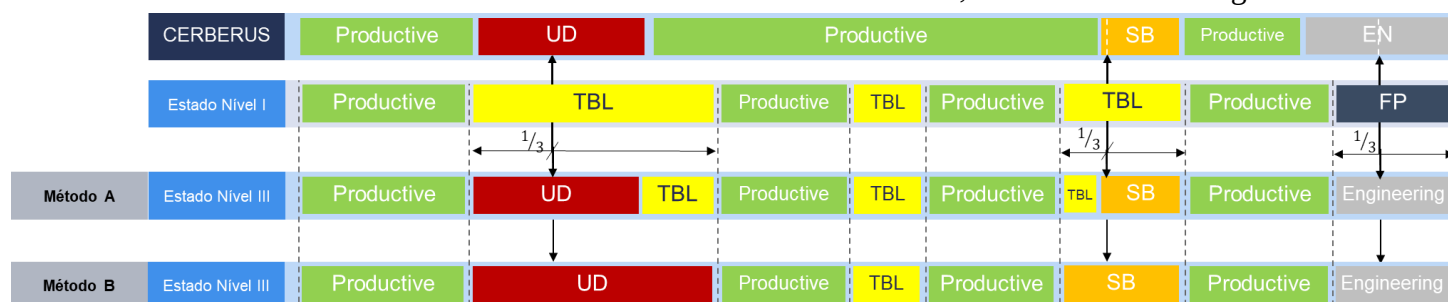


Figura G-1- Dois métodos para o cruzamento de dados com o CERBERUS - caso mais simples

O problema levanta-se quando existe mais do que um estado no CERBERUS durante a duração do TBL, como apresentado na Figura G-2. Nesta situação, a duração do estado do CERBERUS pode não ter muita significância por comparação com a duração do TBL. Para resolver esta situação, experimentou-se atribuir a todo o tempo associado ao TBL o estado encontrado no

¹⁰ Para facilitar a interpretação do texto, todas as referências são realizadas ao estado TBL. No entanto, tudo o que é dito para o TBL é aplicável ao *Failed Processing*, que é o outro estado em que esta procura de informação no CERBERUS é realizada.

CERBERUS, independentemente da sua duração. Este é o método B. Verificou-se que era uma situação regular, para TBL extremamente elevados – várias horas –, que no CERBERUS estivessem definidos vários estados iguais de duração inferior, em vez de um estado contínuo e prolongado. Nestes casos, que não são raros, o método B tem melhores resultados, em termos de representação da realidade.

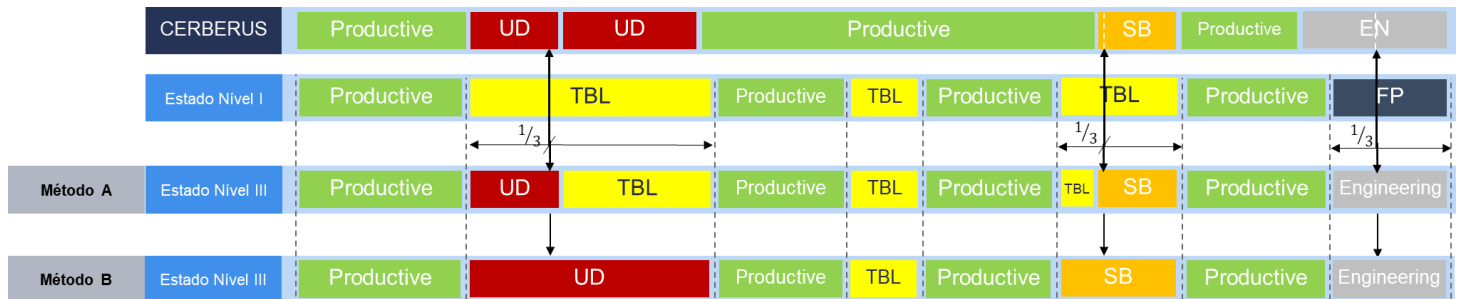


Figura G-2 - Dois métodos para o cruzamento de dados com o CERBERUS - caso mais comum

A maior desvantagem do método B é que a duração que passa a estar associada ao estado do CERBERUS pode ser superior à real – porque fica igual à duração do TBL. Isto significa que se pode estar a atribuir demasiado tempo a EN, UD, SD ou SB e a diminuir a duração do TBL, que pode ser TBL produtivo – e que tem interesse manter – e não apenas tempo em que a máquina está parada.

Na Figura G-3 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos através de cada um destes métodos, para o mês de março, para a família A. Para cada um de quatro dos equipamentos, na coluna da esquerda estão os resultados pela ferramenta através do método B, ao centro os resultados apresentados pelo CERBERUS e à direita os da ferramenta, pelo método A. A opção da empresa foi, ao momento em que o relatório foi escrito, utilizar o método B, pelo que este foi o método utilizado e os gráficos apresentados ao longo do relatório refletem esta opção. Como trabalho futuro fica a proposta de um estudo aprofundado destes dois métodos para estabelecer qual é que deve ser utilizado.

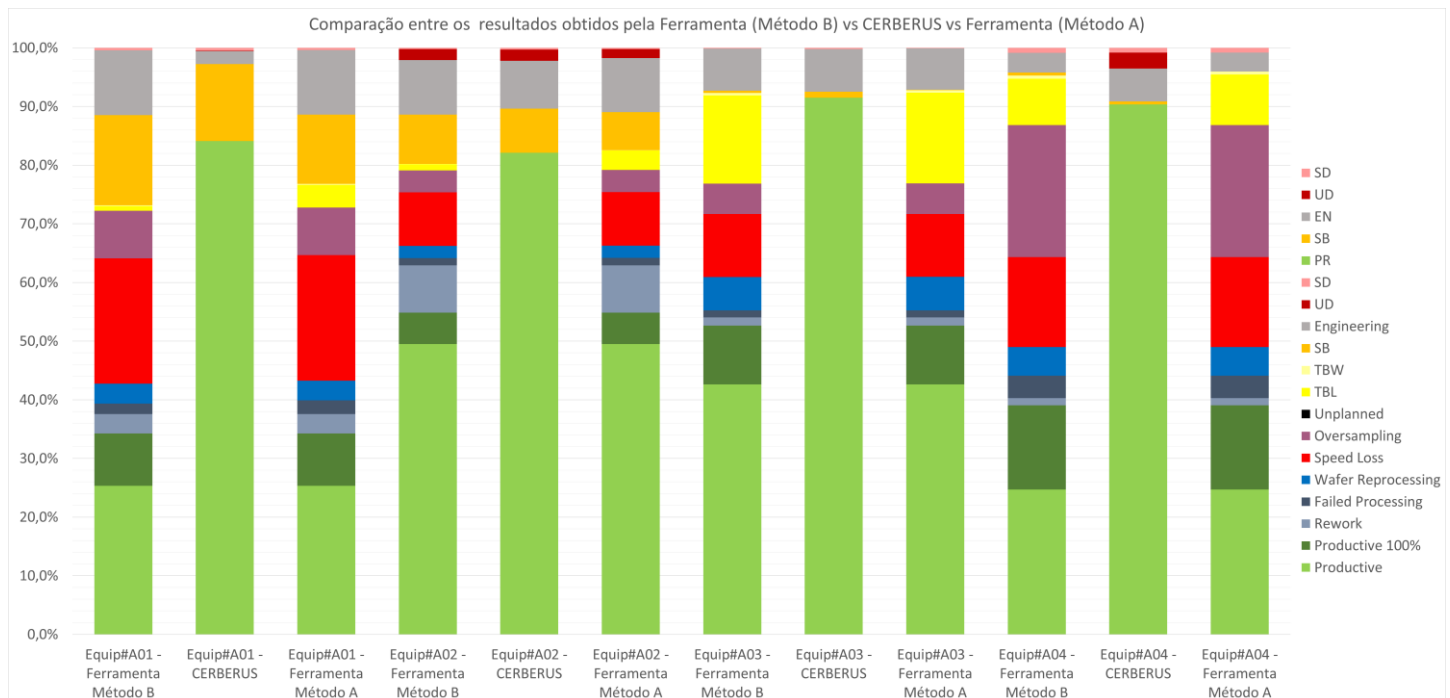


Figura G-3 - Comparação dos resultados apresentados pela ferramenta nos dois métodos, com os do CERBERUS, para a família A, no mês de março